

М.В. Прожега^{1,2}, Е.О. Константинов^{1,2}, В.В. Коровушкин^{1,2}, Н.Н. Смирнов^{1,2},
И.Н. Ковалева², Цзян Чжэнцюань³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия, maksim.prozhega@yandex.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Триботест», Москва, Россия

³Институт исследований специальных материалов для трения и смазки Северо-
Китайского университета водных ресурсов и гидроэнергетики,
Чжэнчжоу 450045, Китай

Триботехнические исследования свойств твердосмазочных покрытий на основе MoS_2 по схеме шар-диск

Аннотация

В работе представлены результаты триботехнических исследований антифрикционных покрытий на основе дисульфида молибдена с добавлениями углеродных и полимерных дисперсных частиц на автоматизированной машине трения «Триботест-02» по схеме шар-диск. Исследования проводились по стандарту ASTM G99 при контактных нагрузках 5 и 20 Н, с различными скоростями скольжения при нормальных условиях. Установлено, что наилучшими триботехническими характеристиками в заданных условиях обладают покрытия на основе MoS_2 с добавлением графита и политетрафторэтилена.

Ключевые слова: машина трения, схема шар-диск, MoS_2 , ПТФЭ, антифрикционные покрытия, триботехнические испытания.

Введение

Покрытия на основе дисульфида молибдена применяются для уменьшения трения и износа в условиях, где жидкие смазочные материалы неэффективны, таких как экстремальные температуры, вакуум, высокие контактные давления и низкие скорости скольжения [1, 2]. Существует несколько методов нанесения таких покрытий, включая магнетронное и ионно-плазменное осаждение, а также нанесение суспензий с последующим отверждением. Наиболее простым является суспензионный метод, при котором на поверхность изделия наносят смесь антифрикционного наполнителя, растворителя и пленкообразующих веществ. Антифрикционный наполнитель обеспечивает низкий коэффициент трения, растворитель поддерживает суспензию в жидком состоянии, а пленкообразующие вещества обеспечивают адгезию покрытия к поверхности и связывают частицы твердой смазки в сплошную пленку [3].

Для улучшения свойств покрытия, таких как твердость, коррозионная и износостойкость, в антифрикционный наполнитель на основе MoS_2 могут добавляться легирующие элементы, например графит или титан. Подбор состава суспензии осуществляется в основном экспериментальным путем. Отечественный производитель твердосмазочных покрытий ООО «Моденжи» активно расширяет

номенклатуру таких покрытий и внедряет опыт научных разработок в серийное производство [4].

Оценка эксплуатационных характеристик покрытий осуществляется через триботехнические испытания, результаты которых могут варьироваться в зависимости от используемого оборудования, кинематической схемы и условий тестирования. Применение стандартизированных методик обеспечивает воспроизводимость данных и возможность их сопоставления с результатами других исследователей [1 - 4].

Наиболее распространены схемы испытаний шар(штифт)-диск соответствующие стандартам ASTM G99 и ASTM G133. Схема шар-диск более предпочтительна для исследования трения при высоких контактных нагрузках, так как индентор в виде шара способен самоцентрироваться, что обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов [5].

Таким образом, триботехнические испытания антифрикционных покрытий важны как для производителей при разработке состава суспензии, обеспечивающего нужные эксплуатационные характеристики, так и для потребителей при оценке свойств покрытия, таких как коэффициент трения, несущая способность, ресурс работоспособности и температурный диапазон.

Цель работы – оценка трибологических свойств современных коммерчески доступных антифрикционных покрытий суспензионного нанесения на основе дисульфида молибдена на модернизированной машине трения по схеме шар-диск.

Методы и материалы

В работе исследовали 6 образцов твердосмазочных покрытий суспензионного нанесения (табл. 1). Образцы 1-5 отечественные коммерчески доступные антифрикционные покрытия производства компании MODENGY (Брянск, Россия). В качестве эталонного объекта сравнения использовали твердосмазочное покрытие ВНИИ НП-212 ТУ 38.101594-80 (образец 6).

Суспензии с антифрикционным наполнителем на основе MoS_2 наносили на диски диаметром 82 мм, толщиной 2 мм из стали 12X18H10T и выдерживали в течение рекомендованного производителем времени при температуре полимеризации.

Таблица 1 - Свойства исследуемых покрытий

№	Покрытие	Твердая смазка	Температура полимеризации, °C	Температура эксплуатации, °C
1	1002	MoS_2	+20	-210...+320
2	1005	MoS_2	+130...+200	-200...+255
3	1006	MoS_2 + графит	+200	-70...+315
4	1014	MoS_2 + ПТФЭ	+200	-75...+255
5	1053	MoS_2	+200	-
6	ВНИИ НП 212	MoS_2	+20	-70...+150

Триботехнические испытания проводили на модернизированной машине трения «Триботест-02» по схеме шар-диск (рис. 1а), разработанной в ООО «Триботест» [6], в соответствии со стандартом ASTM G99. Исследуемый образец с покрытием 1 устанавливали в патрон 2, который приводится во вращение при помощи электродвигателя, установленного в корпусе стенда. Индентор 3 с контртелом в виде шарика диаметром 6,35 мм из стали ШХ15 закреплен на

тензодатчике 4. Нормальная нагрузка прикладывается при помощи грузов 5. Под действием силы трения между образцом и контртелом происходит деформация тензодатчика, сигнал с которого регистрируется системой управления. Чтобы на контртело не действовал вес тензодатчика и кронштейнов, используют балансир 6. Возможность устанавливать необходимый радиус трения обеспечивается при помощи подвижной каретки 7. Управление машиной трения и вывод измеряемого коэффициента трения осуществляется с помощью запатентованного программного обеспечения (рис. 1б) [6].



а

б

Рисунок 1 – Внешний вид машины трения (а) и окна управляющей программы (б).

Технические характеристики машины трения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики машины трения «Триботест-02»

№	Параметр	Диапазон значений	Размерность
1	Нагрузка на образец	1...25	Н
2	Частота вращения диска	1...2000	об/мин
3	Линейный износ	0,002...5	мм

Испытания проводили при нормальных условиях, режимы испытаний приедены в табл. 2. В 1 серии опытов при заданном времени испытания – 30 мин оценивали коэффициент трения f . Во 2 серии опытов при большей нагрузке и скорости регистрировали предельный путь трения L , который выдерживает покрытие до повышения значения коэффициента трения до 0,3.

Таблица 3 – Режимы испытаний

Серия опытов	P , Н	v , м/с	d , мм	n , мин ⁻¹	Критерий работоспособности
1	5	0,1	32	60	f
2	20	0,8	50	310	L

Нормальная нагрузка P (Н) задается при помощи грузов и остается постоянной в течение всего времени испытания. Скорость скольжения v (м/с) образца относительно контртела задается при подготовке испытания. Частота вращения n (мин⁻¹) патрона с образцом автоматически вычисляется системой управления стендом в зависимости от диаметра трения d (мм) по формуле:

$$n = \frac{60 \cdot 1000 \cdot v}{\pi d} \quad (1)$$

Результаты и обсуждение

Результаты триботехнических испытаний приведены в табл. 3. В 1 серии опытов из 6 образцов только 2 (1006 и 1014) выдержали испытание в течение 30 мин. ($L = 280$ м). Коэффициент трения остальных образцов достиг значения 0,3 раньше окончания заданного времени испытания. Несущая способность покрытий 1006 и 1014 выше, чем у других образцов, а коэффициент трения (0,10 и 0,12 соответственно) на 30-50% и 20-40% ниже.

Таблица 3 - Результаты испытаний

№	Покрытие	f		L , м	
		Серия опытов			
		1	2	1	2
1	1002	0.20	0.18	131±0,5	348±1,0
2	1005	0.16	0.20	216±1,0	57±0,5
3	1006	0.10	0.10	282±0,5	18668±1,0
4	1014	0.12	0.12	281±0,5	1655±1,0
5	1053	0.15	0.09	180±1,0	87±0,5
6	ВНИИ НП 212212	0.15	0.23	167±1,0	72±0,5

Образцы покрытий на основе дисульфида молибдена без дисперсных добавок при заданных условиях испытаний показывают меньшее значение пройденного пути трения до разрушения покрытия и более высокие значения коэффициента трения.

В 1 серии опытов образец покрытия 1006 с добавлением графита показал наименьшее значение коэффициента трения 0,10, а образец покрытия 1014 с ПТФЭ – 0,12. В процессе испытания по 1 серии покрытие не разрушилось. Во 2 серии опытов образец 1006 с графитом прошел до разрушения наибольший путь трения – 18668 м, путь трения покрытия 1014 с ПТФЭ составил 1655.

Согласно протоколу испытаний образца 1006 (рис. 2), в течение всего времени опыта сохраняется стабильное значение коэффициента трения. К концу испытания наблюдалось незначительное снижение коэффициента трения, после чего наступало разрушение покрытие. Падение коэффициента трения возможно связано с отслаиванием частиц покрытия, которое предшествует разрушению смазочной пленки и контакту металл-металл, вызывающему резкое повышение трения

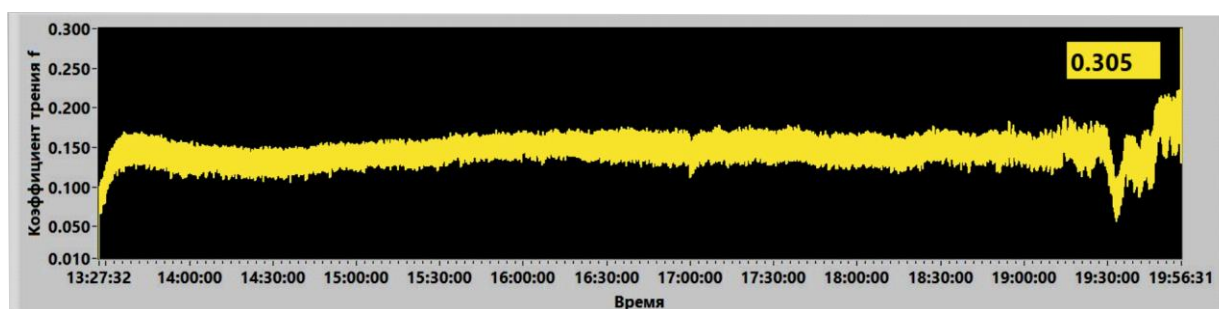


Рисунок 2 – Протокол испытания образца 1006

Заключение

Триботехнические исследования твердосмазочных покрытий на основе MoS_2 показали перспективность применения в качестве дисперсных добавок графита и ПТФЭ для снижения коэффициента трения и увеличения ресурса работоспособности покрытий. Наилучшие трибологические свойства при заданных условиях испытаний показал образец покрытия с добавлением графита: наименьший коэффициент трения - 0,10 и наибольший путь трения - 18 668 м. Коэффициент трения образца покрытия с ПТФЭ составил 0,12, а путь трения в 11 раз меньше –

1655 м. Образцы покрытий, в которых в качестве антифрикционного наполнителя содержится только MoS₂ при заданных условиях показали неудовлетворительный результат, покрытие разрушалось в 5-300 раз быстрее, чем у образцов с дисперсными добавками.

Результаты исследований полученные на модернизированной машине трения «Триботест-02» подтвердили хорошую воспроизводимость результатов с машиной трения «Триботест-01» [4, 5], что говорит об оптимальной конструкции прибора позволяющей проводить испытания согласно методике ASTM G99.

Благодарности

Благодарим ООО «Моденжи» в лице М.И. Прудникова за предоставление образцов для проведения сравнительных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хопин П.Н., Гриб В.В. Термокорееляционная оценка ресурса сопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе MoS₂, нанесенными магнетронным и другими методами, в условиях вакуума. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2021, № 7, с. 72–80, <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-7-72-80>
2. Prozhega M.V., Kharkov M.M., Reschikov E.O., Rykunov G.I., Kaziev A.V., Kukushkina M.S., Kolodko D.V. and Stepanova T.V. Estimation of MoS₂ coating performance on bronze and steel in vacuum at high temperatures / Coatings, 2022, vol. 12, no. 2, p. 125. <https://doi.org/10.3390/coatings12020125>
3. Wang X, Ma C, Yang G, et al. Preparation of molybdenum disulfide/bentonite nanohybrid and its tribological properties as lubricant for water-based drilling fluids / Tribology International, 2025, 202: 110309. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4948070>
4. Титов Н.В., Кузнецов И.С., Логачев В.Н., Прудников М.И., Ковалева И.Н. Эффективность применения антифрикционных твердосмазочных покрытий для пар трения «металл–полимер» // Трение и износ. 2024. – Т. 45, №2. – С. 110–117. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2024-45-2-110-117>
5. Prozhega M.V., Reschikov E.O. Solid lubricating coatings tribological test rig development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 32th International Conference of Young Scientists and Students Topical Problems of Mechanical Engineering 2020 (TopME 2020), Москва, 02–04 декабря 2020 года / Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). – Москва: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1129/1/012029>
6. Пат. RU 2024691284 Российская Федерация, Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. TRIBODATA/ Прожега М.В., Смирнов Н.Н., Константинов Е.О., Коровушкин В.В.; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Триботест». - № 2024690096; заявл. 10.12.2024; опублик. 20.12.2024 Бюл. № 12

M.V. Prozhega^{1,2}, E.O. Konstantinov^{1,2}, V.V. Korovushkin^{1,2}, N.N. Smirnov^{1,2}, I.N. Kavaliova² Jiang Zhengquan³

¹Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, maksim.prozhega@yandex.ru

²LLC «TRIBOTEST», Moscow, Russia

³Institute of Special Friction and Lubricating Materials, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China, Zhengzhou, China

TRIBOTECHNICAL STUDIES OF PROPERTIES OF HARD-LUBRICATING COATINGS BASED ON MOS₂ IN A BALL-DISK PATTERN

Abstract

The paper presents the results of tribotechnical investigations of antifriction coatings based on molybdenum disulfide with the addition of carbon and polymeric dispersed particles on an automated friction machine “Tribotest-02” on the ball-disk scheme. Investigations were carried out according to ASTM G99 standard at contact loads of 5 and 20 N, with different sliding speeds under normal conditions. It is established that the best tribotechnical characteristics under the given conditions are possessed by coatings based on MoS₂ with addition of graphite and polytetrafluoroethylene.

Keywords: friction machine, ball-disk scheme, MoS₂, PTFE, antifriction coatings, tribotechnical tests.