

residual stresses when applying polymers on the inner surfaces of bushings is proposed.

Key words: friction units, polyamide coatings, metal substrate, adhesion.

УДК 621.89

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-246

С.Ю. Мишаков, П.Н. Хопин
Московский авиационный институт (МАИ),
Москва, Россия, s.mishakov@mail.ru

ОЦЕНКА РЕСУРСА ФРИКЦИОННЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ РЕВЕРСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация

В данной работе проведено обобщение имеющихся результатов исследований триботехнических характеристик реверсивных механизмов с твёрдосмазочными покрытиями (ТСП), а также выполнен сравнительный анализ трибоиспытаний фрикционных сопряжений с суспензионными покрытиями фирмы Molykote и ТСП типа ВНИИ НП при однонаправленном и реверсивном вращательном движении.

Ключевые слова: твёрдосмазочные покрытия, реверсивное движение, вращательное однонаправленное движение.

Введение

Работа посвящена исследованию процессов трения в реверсивных механизмах (РМ) и узлах. Конструкция данных узлов весьма разнообразна, однако принцип их работы сводится к одному – периодическое изменение направления вращательного или поступательного движения.

Поскольку рассматриваемые пары трения могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур (до +400 °С) и давлений окружающей среды (от 0,1 МПа до глубокого космического вакуума), а также подвергаться интенсивному радиационному воздействию, то для обеспечения требуемых характеристик изделия (коэффициента трения, долговечности, износостойкости) применяются различные смазочные материалы.

Наиболее перспективными для данных условий считаются твёрдосмазочные покрытия (ТСП). Широкое распространение среди них получили ТСП на основе дисульфида молибдена (MoS_2) с разными связующими компонентами [1-11]. Их можно применять как в условиях высокого вакуума, так и в сухих средах и использовать в космической технике, что является всё более актуальным фактором, поскольку требования к срокам пребывания техники в космосе постоянно растут.

В настоящее время существует множество различных методов расчёта геометрических и кинематических параметров подобных механизмов, в то время как оценка триботехнических показателей носит частичный, отрывочный характер, не позволяющий в полной мере оценить параметры механизма до его изготовления и применения.

Методы и материалы

Для сравнительного анализа фрикционных сопряжений с ТСП типа ВНИИ НП

использовались результаты исследований, представленные в работе [12]. Объектом исследования служили серийные ТСП суспензионного нанесения на основе MoS_2 . Испытания проводились при комнатной температуре ($20\text{ }^\circ\text{C}$). В качестве образцов использовались наружные кольца роликовых подшипников №7204 диаметром $\text{O}47$ мм. При реверсивном вращательном движении испытания проводись на режиме 200 колебаний/мин и угле качения $\pm 10^\circ$, а для случая вращательного однонаправленного движение частота вращения кольца составляла 200 об/мин. Системой нагружения в обоих случаях обеспечивается начальное контактное напряжение σ_{max} , равное 7500 кгс/см^2 . Принципиальная схема прибора для проведения испытаний представлена на рис. 1.

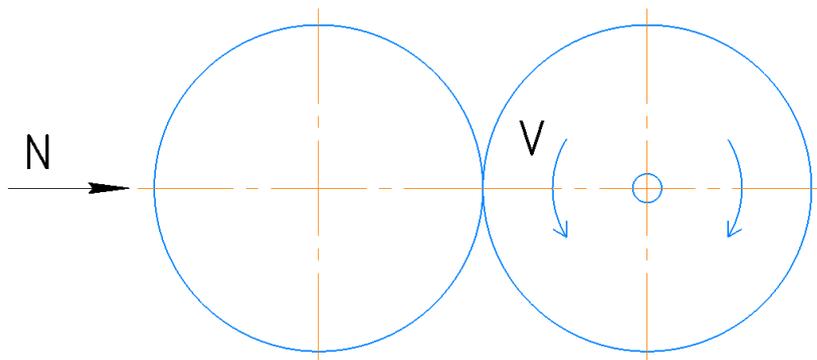


Рисунок 1 – Принципиальная схема прибора для испытания реверсивной пары трения

Результаты исследования.

Испытуемое покрытие наносилось на качающееся кольцо. Опыты проводились до достижения коэффициента трения $f_{\text{тр.}} = 0,1$. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний ТСП при однонаправленном вращательном и реверсивном движении

Покрытие	Состав [13]	Путь трения при вращении $S_{\text{в}}$ [м], при $n = 200$ об/мин	Путь трения при колебаниях $S_{\text{к}}$ [м], при $n = 200$ кол./мин	Изменение долговечности $\varepsilon = S_{\text{в}}/S_{\text{к}}$
ВНИИ НП-230	MoS_2 + эпоксидная смола	60000	7540	8
ВНИИ НП-212	MoS_2 + мочевино-формальдегидная смола	26800	1380	19,4
ВНИИ НП-250	MoS_2 + кремнийорганическая смола	16400	1010	16,2
ВНИИ НП-229	MoS_2 + силикат натрия	6700	200	33,5

Как видно из данных таблицы 1, переход к реверсивному движению привёл к существенному снижению долговечности ε , которое носит избирательный характер и зависит от природы и типа связующего компонента покрытия. Долговечность лучшего покрытия (ВНИИ НП-230) с эпоксидным связующим при переходе от однонаправленного вращательного движения к реверсивному снизилась в 8 раз, покрытия ВНИИ НП-250 – в 16,2 раза и для покрытия ВНИИ НП-229 снижение составило более чем в 30 раз. Наибольшую стабильность к изменённым условиям работы и максимальную долговечность в режиме колебательного движения

показало покрытие ВНИИ НП-230 на основе органического связующего. С переходом к новому виду движения выявилась особая «чувствительность» покрытия ВНИИ НП-212 с органическим связующим. Степень снижения его долговечности (в 19,4 раза) характерна для покрытий на неорганической основе (ВНИИ НП-229). Визуально полученные результаты представлены на рис. 2.

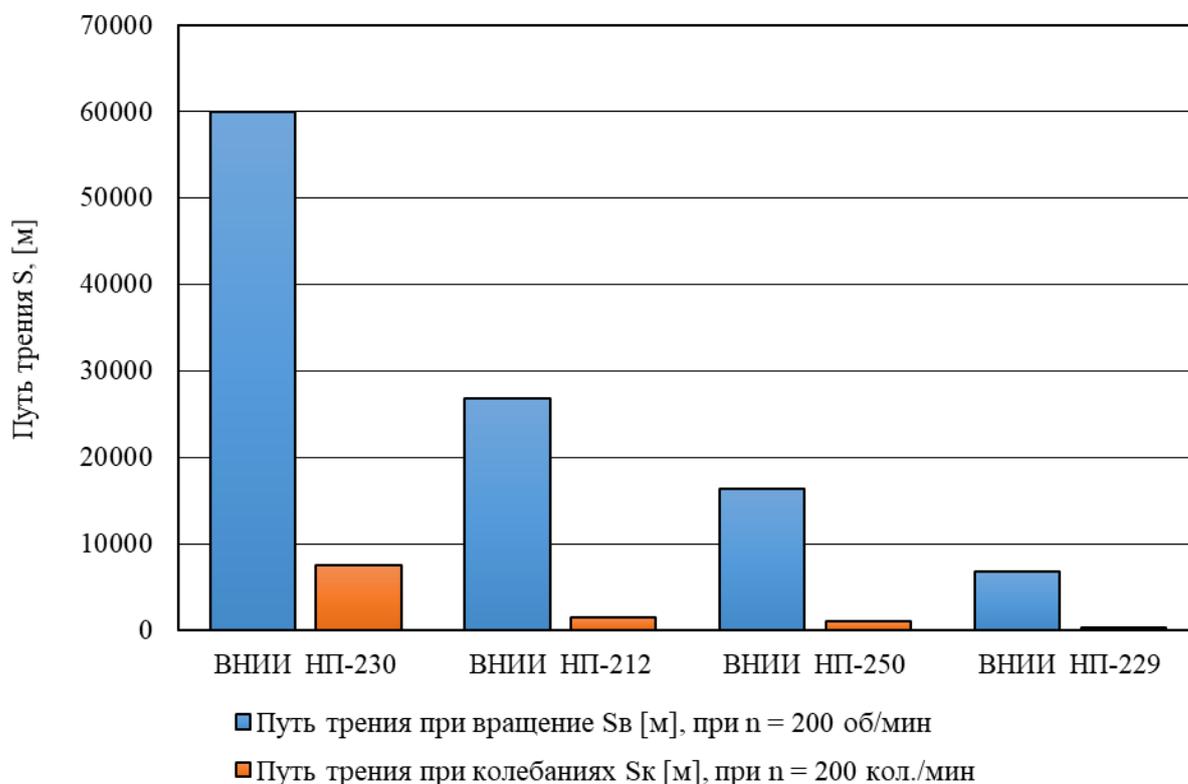


Рисунок 2 – Результаты испытаний пар трения с ТСП типа ВНИИ НП при однонаправленном вращательном и реверсивном движении

Результаты испытаний фрикционных сопряжений в различных механических узлах представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний ТСП при однонаправленном вращательном и реверсивном движении [14]

Испытываемое покрытие	Узел трения	Тип движения	Режимы испытания	Путь трения, м/долговечность, ч
ВНИИ НП-212	Шарнирное соединение (в сферическое кольцо вставлен палец)	Реверсивно-вращательное	Материал – ШХ15; температура от -60 до 80 °С; угол качения ±20°; нагрузка переменная от 0 до 10,5 т; скорость скольжения 3 мм/сек	2000/200

Испытываемое покрытие	Узел трения	Тип движения	Режимы испытания	Путь трения, м/долговечность, ч
ВНИИ НП-213	Цилиндрический плунжер – корпус	Реверсивно-вращательное	Материал (корпус и плунжер) – X17H2; температура от 280 до 300 °С; избыточное давление 6 ат ; угол качения $\pm 90^\circ$	240/4000 циклов
ВНИИ НП-229	Пара шток – втулка	Возвратно-поступательное	Материал – 30ХГСА - чугуи; температура от -60 до 350 °С; удельное давление на поверхности трения 0,3 кг/мм ²	-/100 ч
	Подшипник скольжения 8х22 и 140 х175с качательным движением $\pm 30^\circ$ в 1 сек.	Реверсивно-вращательное		-/100 ч
	Подшипник качения с качательным движением $\pm 30^\circ$ в 1 сек.	Реверсивно-вращательное		-/100 ч

Для сравнительного анализа покрытий фирмы Molykote были выбраны ТСП на основе дисульфида молибдена (MoS_2), графита и синтетических твёрдых смазок [15]. Испытания проводились по схеме брусок – кольцо, согласно стандарту ASTM D-2714, на машине LFW-1 (рис. 3).

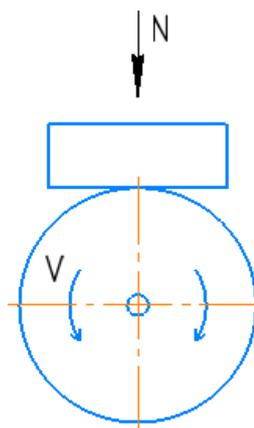


Рисунок 3 – Схема трения пары брусок – кольцо, согласно стандарту ASTM D-2714, на машине LFW-1

При вращательном движении до коэффициента трения $f = 0,1$ при нагрузке $N = 2860$ Н (для ТСП Molykote 7405 и D-7405 нагрузка составляла $N = 680$ Н), частоте вращения $n = 72$ об/мин и скорости скольжения $V = 7,9$ м/мин; при возвратно-поступательном (реверсивном) движении – до коэффициента трения $f = 0,08$ при нагрузке $N = 900$ Н, частоте $w = 89,5$ циклов/мин) для поверхности без предварительной обработки, после фосфатирования, после пескоструйной обработки. Результаты испытаний покрытий представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний ТСП Molykote при однонаправленном вращательном и реверсивном движении [15]

Покрытие	Состав	Связка	Путь трения при вращение S_v [м], при $V_{ск} = 0,132$ м/с	Путь трения при колебаниях S_k [м], при $V_{рsv} = 0,082$ м/с	Изменение долговечности $\varepsilon = S_v/S_k$
			без предварительной обработки / фосфатирование / пескоструйная обработка		
ТСП на основе MoS_2 и других наполнителей					
Molykote 106	MoS_2 (18%) + графит(6%)	Эпоксидная смола	- / 27611 / -	- / 2491 / -	- / 11,1 / -
Molykote D-106	MoS_2 (16%) + графит (4,9%)	Эпоксидная смола	- / 4282 / -	- / 542 / -	- / 7,9 / -
Molykote 3400A	MoS_2 (12%)	Эпоксидная смола	- / 12551 / -	- / 256 / -	- / 49,1 / -
Molykote 3400A Leadfree	MoS_2 (12%)	Эпоксидная смола	- / 7087 / -	- / 305 / -	- / 23,3 / -
Molykote 3402C	MoS_2 (10%)	Органическая	- / - / 6644	- / - / 152	- / - / 43,6
Molykote 3402C Leadfree	MoS_2	Органическая	- / 16065 / 11045	- / 796 / -	- / 20,2 / -
Molykote 7400	MoS_2 (13%) + графит (6,4%)	Акриловая	- / 50646 / -	- / 463 / -	- / 109,4 / -
Molykote 7409	MoS_2 (15%) + графит (1,5%)	Полиамид-имидная	- / 53746 / -	- / 1304 / -	- / 41,2 / -
Molykote D-7409	MoS_2 + графит	Полиамид-имидная	- / - / -	- / 1160 / 962	- / - / -
Molykote 7620	MoS_2 (17%) + графит (1,8%)	Полиамид-имидная	- / 1920 / -	- / 122 / -	- / 15,8 / -
Molykote D-7620	MoS_2 (18%) + графит (2%)	Полиамид-имидная	- / 2953 / -	- / 347 / -	- / 8,5 / -
Molykote D-321R	MoS_2 (19%) + графит (4,9%)	Полибутил-титанат	31303/21558/45182	1084/2436/2205	28,9 / 8,8 / 20,9
Molykote D-3484	MoS_2 (20%) + графит (5,1%)	Фенольная	44001/18605/22001	548/1492/1864	80,3/12,5/11,8
ТСП на основе графита					
Molykote D-10	Графит (17%)	Полиамид-имидная	- / 295 / -	- / 140 / -	- / 2,1 / -
ТСП на основе синтетических твёрдых смазок					
Molykote 7405	Синтетическая твёрдая смазка	Органическая	- / 9302 / -	- / 24 / -	- / 381,8 / -
Molykote D-7405	Синтетическая твёрдая смазка	Полиамид-имидная	- / 12920 / 15651	- / 52 / 49	- / 249,5 / 321,2

Аналогично, как и в случае с покрытиями ВНИИ НП, переход к реверсивному движению привёл к снижению долговечности. Наибольшую долговечность при реверсивном движении показали покрытия Molykote 106 ($S_k = 2491$ м) с эпоксидной смолой в качестве связующего, Molykote D-321R ($S_k = 2436$ м) с полибутил-титанатовой связкой и покрытие Molykote D-3484 с фенольной связкой после пескоструйной обработки показало результат $S_k = 1864$ м. Остальные типы ТСП, при переходе к реверсивному движению, показали значительно худшие результаты, даже в рамках группы с одинаковым материалом связки (изменение долговечности

ε могло составлять 20 и более раз) (рис.4).

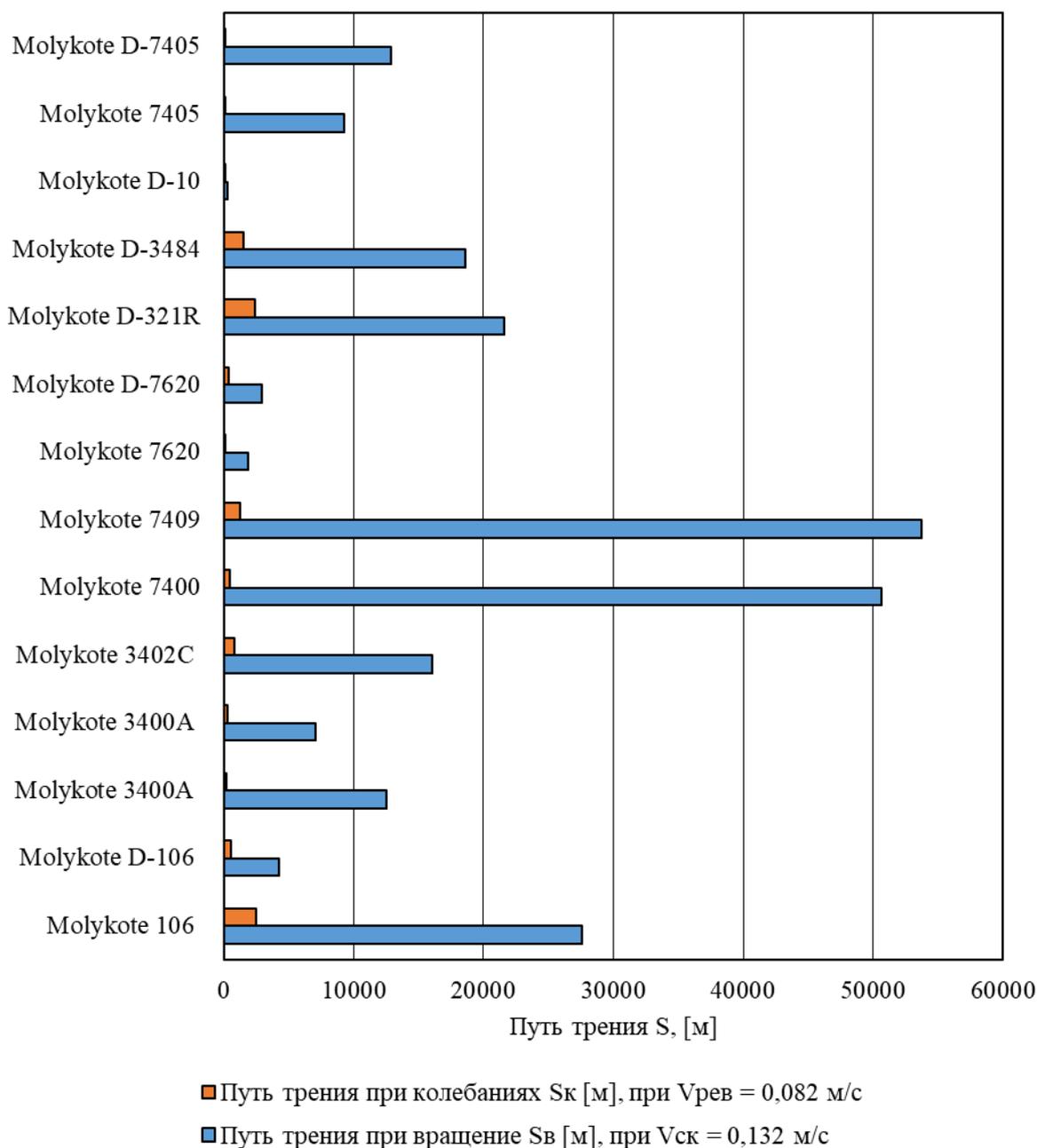


Рисунок 4 – Результаты испытаний ТСП Molykote при однонаправленном вращательном и реверсивном движении с предварительным фосфатированием рабочей поверхности перед нанесением ТСП

В дальнейшем планируется провести оценку снижения ресурса пар трения с ТСП при реверсивном движении по отношению к однонаправленному трению скольжения по методике, рекомендованной в работе [13].

Заключение.

1. На основе обработки литературных источников получены данные, расширяющие информацию о поведении твёрдосмазочных покрытий в механо-динамических условиях работы.

2. Проанализированы данные испытаний покрытий в реальных узлах трения при соответствующих нагрузках и температуре, что позволяет предварительно оценить целесообразность применения ТСП в том или ином изделии.

3. Выполнен сравнительный анализ отечественных ТСП суспензионного нанесения типа ВНИИ НП и зарубежных покрытий Molykote в ходе, которого выявлена «чувствительность» покрытий различного состава к перемене типа движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khopin P. N. Test Analysis of Friction Couples with Solid Lubricant Coatings under Ground-Space Conditions and Prediction of Tribological Characteristics / P. N. Khopin // Journal of Friction and Wear. - 2018. - Vol. 39, No. 2.-P. 137-144.

2. Khopin P. N. Durability Evaluation for Friction Pairs with Solid Lubrication Coatings under Reverse Motion / P. N. Khopin, O. V. Kozlova, L. E. Gorbach // Journal of Friction and Wear. - 2018. - Vol. 39, No. 6. - P. 505-511.

3. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Т. 9. № 4. С. 714-718.

4. Васильев А.П., Стручкова Т.С., Лазарева Н.Н., Никитина А.В., Алексеев А.Г. Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. 27(4) с. 618–630.

5. Shasherina, S., Skotnikova, M., Sokolov, A. Forming of nanostructured Cu-Ni coverings of tool steel H12MF after surface machining attrition treatment // Materials Today: Proceedings, 2019, 30, стр. 619–624.

6. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

7. Skotnikova, M.A., Artemyev, V.P., Shasherina, S.A., Paitova, O.V., Tsvetkova, G.V. Tribotechnical properties of nanostructured coppernickel coatings // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, стр. 61–71.

8. Syundyukov, I., Skotnikova, M., Padgurskas, J., Tsvetkova, G., Tarasenko, E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15 //Materials Today: Proceedings, 2019, 30, стр. 650–655.

9. Skotnikova, M.A., Breki, A.D., Evsinc, M.G., Kalinind, V.Y., Wasilewski, M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils // AIP Conference Proceedings, 2021, 2340, 060005

10. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO) FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

11. Khopin, P. N. Properties of Solid Lubricant Coatings Based on Molybdenum Diselenide Applied by Different Methods at Atmospheric Pressure and in Vacuum / P. N. Khopin, O. B. Sil'chenko, V. V. Grib // Russian Engineering Research. - 2022. - Vol. 42, No. 4. - P. 342-347.

12. Михеев В. А., Семёнов К. А., Николаев В. В., Рубцова З. С. Оценка долговечности твёрдосмазочных покрытий в условиях реверсивного колебательного движения // Труды ВНИИ НП. - М. - 1976, № XVII, 124-128

13. Хопин, П. Н. Оценка долговечности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями при реверсивном движении / П. Н. Хопин, О. В. Козлова, Л. Е. Горбач // Трение и износ. - 2018. - Т. 39. - № 6. - С. 649-656.

14. Сентюрихина Л. Н., Опарина Е. М. Твёрдые дисульфидмолибденовые смазки. - М.: Химия. - 1966

15. Антифрикционные покрытия // atf.ru URL: https://atf.ru/production/molykote/antifriktsionnye_pokrytiya/afp_na_osnove_mos2/ (дата обращения: 02.11.2023).

S.Yu. Mishakov, P.N. Hopin
Moscow Aviation Institute (MAI),
Moscow, Russia, s.mishakov@mail.ru

RESOURCE ASSESSMENT OF FRICTION MATINGS WITH SOLID-LUBRICANT COATINGS FOR MECHANISMS OPERATING IN REVERSIVE MOTION CONDITIONS

Abstract

This paper summarizes the available results of studies of the tribological characteristics of reversible mechanisms with solid lubricant coatings (SLC), and also performs a comparative analysis of tribological tests of friction matings with suspension coatings from Molykote and SLC of the VNII NP type with unidirectional and reverse rotational motion.

Keywords: solid lubricant coatings, reverse movement, unidirectional rotational movement.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-247

Д. В. Ляшенко¹, М. В. Ляшенко¹, Я. Нагхави², А.Д. Бреки¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, liashenko.dv@gmail.com
²The University of Jordan, Amman, Jordan

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА ОБРАЗЦЫ ИМИТАТОРЫ ВАЛОВ РОТОРОВ-НАГНЕТАТЕЛЕЙ

Аннотация

Настоящая работа посвящена трибологическим исследованиям покрытий, нанесенных посредством роботизированной технологической установки лазерной наплавки на образцы-имитаторы валов роторов-нагнетателей. Восстановительная наплавка используется для ремонта и восстановления деталей, поврежденных в процессе эксплуатации, и качество этой наплавки играет ключевую роль в обеспечении долговечности и надежности восстановленных деталей. Результаты исследований позволят улучшить существующие технологии наплавки, а также разработать рекомендации по подготовке и обработке деталей, что будет способствовать повышению их эксплуатационных характеристик и снижению издержек на ремонт и обслуживание.

Ключевые слова: наплавка, износ, трибология, покрытие, трение, металлографический анализ.

Введение

Восстановительная наплавка применяется для ремонта деталей, поверхность которых получает повреждения в результате эксплуатации. Качество восстановления детали зависит от характеристик наплавленного слоя, поскольку они