

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.891:519.28

## Сравнительная оценка работоспособности твердосмазочных покрытий для функционирования в условиях вакуума

П.Н. Хопин, С.Ю. Мишаков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## Comparative assessment of the performance of hard-lubricating coatings for operation in vacuum conditions

P.N. Khopin, S.Y. Mishakov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Проведены трибологические испытания по схеме шарик — диск твердосмазочных покрытий (ТСП), нанесенных магнетронным методом, на приборе TriboLAB, входящем в состав многофункционального оборудования EuTEF ESA европейской космической лаборатории Columbus международной космической станции. Определенные по результатам испытаний средний ресурс (11 915 мин) и коэффициент трения (0,03) пар трения с ТСП состава MoSx — WC превосходят аналогичные параметры, полученные при наземных испытаниях, на 61,4 и 44,4 % соответственно. Анализ результатов испытаний пар трения на вакуумной модели TriboLab в наземных условиях показал, что у ТСП состава MoSx — WC средний ресурс (3068 мин) больше на 38 %, а коэффициент трения (0,054) на 48 %, чем у ТСП на основе MoS<sub>2</sub> без примесей. Сравнительная оценка ресурса пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, полученных в условиях вакуума разными методами напыления, выявила, что наибольший ресурс (10 000 мин) имеет ТСП на основе MoS<sub>2</sub> высокочастотного метода напыления толщиной 0,2 мкм при поверхностной температуре трения 34,6 °C и коэффициенте трения 0,04.

EDN: EFES EI, <https://elibrary/efesei>

**Ключевые слова:** твердосмазочные покрытия, триботехнические характеристики, прибор TriboLab, наземные испытания, условия вакуума

As a result of the analysis of tribo-tests according to the "ball-disc" scheme of solid-lubricant coatings (SLC) of magnetron deposition on the TriboLAB device installed in the EuTEF ESA multifunctional equipment of the Columbus module of the International Space Station, the average resource of 11915 minutes was calculated. friction couplings with a MoSx — WC SLC, which exceeds a similar parameter in ground tests by 61.4%. The coefficient of friction of the specified MoSx — WC SLC composition 0.03 at the same time turns out to be 44.4 % higher than in ground tests. The analysis of the results of tribo-tests carried out on

the TriboLab vacuum model under ground conditions showed that the average life of friction pairs with a MoSx — WC SLC composition is 3068 min. It is 38 % higher than that of MoS<sub>2</sub>-based SLC without impurities. At the same time, the average coefficient of friction of the combined type 0.054 is 48 % higher than that of pure SLC. A comparative assessment of the resource of friction pairs in a MoS<sub>2</sub>-based SLC under vacuum conditions obtained by various application methods showed that the greatest resource was found by a MoS<sub>2</sub>-based SLC with a thickness of 0.2 microns of the high-frequency spraying method 10000 min. at a contact friction temperature of 34.6 °C and a coefficient of friction 0.04.

EDN: EFESSEI, <https://elibrary/efesei>

**Keywords:** solid lubricant coatings, tribotechnical characteristics, TriboLab device, ground tests, vacuum conditions

Твердосмазочные покрытия (ТСП) получили широкое применение в узлах трения механизмов, автономно функционирующих в условиях космического вакуума [1–12]. Чтобы прогнозировать их ресурс и разрабатывать новые технологии, необходимо оценить триботехнические характеристики узлов трения с ТСП.

ТСП разрабатываются как за рубежом, так и в России. К последним разработкам относятся ТСП на основе дисульфида молибдена, нанесенного магнетронным методом, с включением карбида вольфрама (далее ТСП MoS<sub>2</sub> — WC), испытанных на Международной космической станции (МКС) [13].

В феврале 2008 г. шаттл Discovery ST122 доставил европейскую космическую лабораторию Columbus на МКС. Одно из помещений внешней полезной нагрузки Columbus занято многофункциональным оборудованием EuTEF (European Technology Exposure Facility) Европейского космического агентства (European Space Agency — ESA), в состав которого входят семь различных научных приборов, том числе TriboLab для проведения трибологических исследований.

Прибор TriboLab позволяет проводить трибологические испытания (далее трибоиспытания) смазочных материалов методом «штифт на диске» и методом испытания шарикоподшипников в условиях, которые невозможно одновременно смоделировать на Земле (отсутствие гравитации, вакуум, микровибрации, излучение LEO (Low Earth Orbit) и т. д.)

Цель работы — сравнение трибологических характеристик пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> отечественного и зарубежного производства, испытанных в условиях вакуума.

Рассмотрены результаты трибоиспытаний легированных покрытий MoSx методом «штифт на диске» на орбите в сравнении с данными наземных испытаний.

**Материалы и инструменты.** На орбите МКС триботехнические характеристики пар трения ТСП MoS<sub>2</sub> — WC оценивали методом «штифт на диске» с помощью прибора TriboLab.

Параметрами испытаний являлись постоянная нормальная нагрузка  $N = 5$  Н и частота вращения  $n = 50$  мин<sup>-1</sup>. Шарик диаметром 6 мм из нержавеющей стали помещали на фиксированный радиус 25 мм на диске из нержавеющей стали AISI 440С твердостью  $57 \pm 1$  HRC.

Критерием испытания для каждого диска служило достижение среднего коэффициента трения  $f_{тр} > 0,2$  в течение 60 с. Контролируемыми параметрами были нормальная нагрузка, коэффициент трения скольжения  $f_{тр}$  и угловая скорость. Частота сбора данных составляла 1 Гц. Схема трибоиспытаний шарик — диск приведена на рис. 1.

Трибоиспытания в условиях вакуума ( $< 10^{-6}$  мбар) на Земле проводили в вакуумной модели TriboLab (VTM) на дисках с ТСП MoSx — WC и на коммерческих дисках из MoS<sub>2</sub> без примесей. Характеристики трибометра TriboLab описаны в работе [14]. Параметрами испытаний по схеме шарик — диск являлись постоянная частота вращения  $n = 75$  мин<sup>-1</sup> и нормальная нагрузка  $N = 5$  Н, приложенная пружиной кручения. Контртелом являлся шарик из нержавеющей стали диаметром 6 мм. Критерием тестирования служило достижение среднего коэффициента трения  $f_{тр} > 0,2$  в течение 100 с. Контролируемыми параметрами бы-

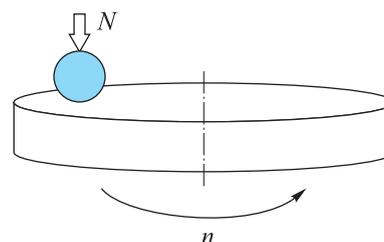


Рис. 1. Схема трибоиспытаний шарик — диск

ли нормальная нагрузка, тангенциальная сила и коэффициент трения. Скорость сбора данных составляла 150 данных в минуту.

ТСП MoSx — WC наносили на закаленные и отпущенные диски диаметром 55 мм и толщиной 3 мм с параметром шероховатости поверхности 0,2 мкм. Для нанесения покрытия использовали установку PVD с магнетронным распылением CemeCon CC800/8. Пленки, легированные ТСП MoSx — WC, получали магнетронным распылением с четырех мишеней (от одной до двух мишеней из MoS<sub>2</sub> и столько же из WC) в Ar-разряде при давлении 0,5...0,7 Па. Толщина нанесенных пленок составляла около 1,2 мкм. Подробная информация об экспериментальной процедуре нанесения ТСП и составе этой смазочной пленки описана ранее [15].

**Результаты трибоиспытаний в условиях нормальной атмосферы.** Результаты испытаний на износ в вакууме пар трения с ТСП MoSx — WC и ТСП MoS<sub>2</sub> без примесей, полученные на вакуумной модели Tribolab, приведены в табл. 1. Здесь и далее  $f_{тр\ max}$ ,  $f_{тр\ ср}$  и  $f_{тр\ min}$  — максимальное, среднее и минимальное значение коэффи-

циента трения образца соответственно. Условия испытания: нормальная нагрузка  $N = 5$  Н; частота вращения  $n = 75$  мин<sup>-1</sup>, контртело — шарик диаметром 6 мм из стали AISI 440C. Цифра в обозначении образца соответствует его номеру, а буква — типу ТСП (М — ТСП MoSx — WC, А — коммерческое ТСП на основе MoS<sub>2</sub> без примесей).

Примеры графических зависимостей коэффициента трения  $f_{тр}$  пар с ТСП от числа циклов наработки  $W$  приведены на рис. 2.

Анализ результатов испытаний (см. табл. 1 и рис. 2) выявил следующее:

- средний ресурс пар трения с ТСП MoSx — WC на 38 % больше, чем у ТСП на основе MoS<sub>2</sub> без примесей;
- средний коэффициент трения ТСП MoSx — WC на 48 % выше, чем у ТСП на основе MoS<sub>2</sub> без примесей;
- начальный коэффициент трения согласно данным табл. 1 существенно больше среднего значения, что можно объяснить наличием окисленной поверхности перед испытанием, хотя на графиках, приведенных на рис. 2, эти изменения не отражены.

Таблица 1

Результаты испытаний ТСП на износ в вакууме, полученные на вакуумной модели Tribolab

Образец	Контактная нагрузка $N$ , Н	Коэффициент трения			Число циклов наработки $W$	Ресурс $\tau$ , мин
		$f_{тр\ max}$	$f_{тр\ ср}$	$f_{тр\ min}$		
M27	5,68	0,160	0,0400	0,000	69 900	932
M14	5,61	0,170	0,0600	0,000	347 100	4628
M5	5,27	0,280	0,0700	0,000	59 100	788
M1	5,13	0,140	0,0500	0,010	241 125	3215
M17	4,96	0,170	0,0700	0,010	249 225	3323
M553	5,09	0,090	0,0500	0,010	500 025	6667
M4	5,51	0,320	0,0800	0,000	108 150	1442
M3	5,03	0,220	0,0700	0,010	197 325	2631
M18	5,55	0,130	0,0600	0,010	492 600	6568
M28	5,02	0,090	0,0200	0,000	109 575	1461
M29	5,45	0,130	0,0400	0,000	196 725	2623
M2	5,72	0,120	0,0400	0,010	190 350	2538
Среднее значение	5,335	0,170	0,0540	0,005	230 100	3068
A1	5,35	0,100	0,0600	0,030	22 050	294
A2	5,74	0,470	0,0100	0,000	227 400	3032
A3	4,84	0,500	0,0400	0,000	179 175	2389
Среднее значение	5,31	0,357	0,0367	0,010	142 875	1905

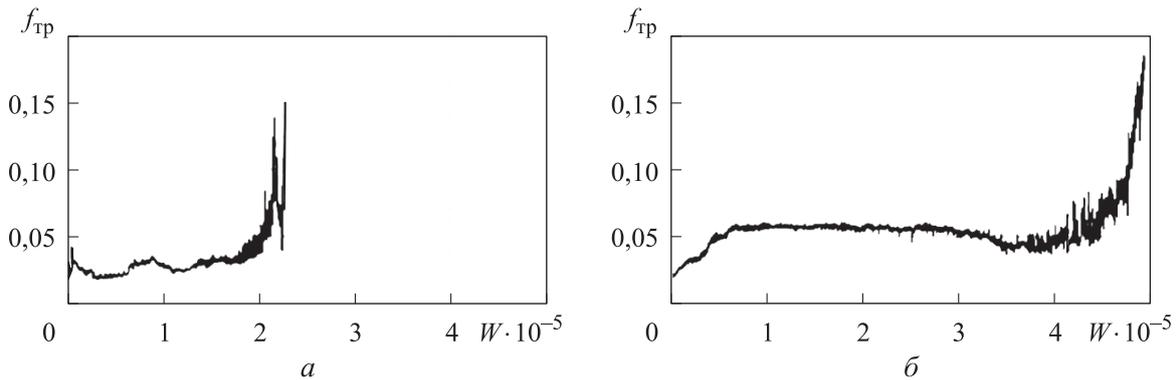


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения  $f_{тр}$  образца А2 из ТСП на основе  $MoS_2$  без примесей (а) и образца М18 из ТСП  $MoSx - WC$  (б), испытанных в вакуумной модели VTM TriboLab, от числа циклов наработки  $W$

**Результаты трибоиспытаний на орбите МКС.** Результаты трибоиспытаний пар трения с ТСП  $MoSx - WC$  на орбите МКС методом «штифт на диске» по аналогичной схеме трения приведены в табл. 2. Условия испытания: нормальная нагрузка  $N = 5$  Н; частота вращения  $n = 50$  мин<sup>-1</sup>; контртело — шарик диаметром 6 мм из стали AISI 440С

Сравнение результатов вакуумных трибоиспытаний пар трения с ТСП  $MoSx - WC$  (см. табл. 1 и 2) позволяет заключить, что на орбите МКС средний ресурс больше на 44,4 %, а коэффициент трения — на 61,4 %, чем на Земле.

**Сравнение триботехнических характеристик ТСП  $MoSx - WC$ , испытанного на орбите МКС, с аналогичными параметрами ТСП других исследователей в условиях вакуума.** Экспериментальными исследованиями, проведенными в условиях вакуума [16], подтверждено определяющее влияние температурного фактора на ресурс рассматриваемых пар трения с ТСП.

Поэтому для сравнительной оценки ресурса ТСП разного типа необходимо определить по-

верхностную температуру трения по ранее предложенной термодинамической зависимости

$$T_{тр} = 3,31 + 291,64v + 0,643p - 282,19v^2, \quad (1)$$

адекватно описывающей процесс в диапазонах контактного давления  $p = 61...121$  МПа, скорости скольжения  $v = 0,087...0,504$  м/с и температуры  $T_{тр} = 83...144$  °С.

**Наземные испытания ТСП  $MoSx - WC$ .** Чтобы оценить поверхностную температуру трения пары с ТСП  $MoSx - WC$ , определяли контактную нагрузку в следующей последовательности.

В работе [13] динамику роста пятна износа в процессе трения не исследовали, поэтому использовали широко применяемую за рубежом относительную интенсивность изнашивания

$$I = \frac{V_{изн}}{NL},$$

где  $V_{изн}$  — объем изношенного материала, мм<sup>3</sup>, Н;  $L$  — путь трения, м.

Таблица 2

**Результаты испытаний ТСП состава  $MoSx - WC$  на орбите МКС, полученные на летной модели TriboLab**

Номер опыта	Контактная нагрузка $N$ , Н	Коэффициент трения			Число циклов наработки $W$	Ресурс, мин
		$f_{тр max}$	$f_{тр ср}$	$f_{тр min}$		
PoD1	4,36	0,09	0,03	0,0100	305 008,0	6100,16
PoD2	4,06	0,20	0,03	0,0100	943 454,0	18 869,08
PoD3	5,16	0,07	0,02	0,0200	1 011 000,0	20 220,00
PoD4	4,99	0,20	0,04	0,0100	123 600,0	2472,00
Среднее значение	4,64	0,14	0,03	0,0125	595 765,5	11 915,31

Таблица 3

Условия трения в экспериментах Мисуоши и Брисуэла

Эксперимент	Контактная нагрузка $N$ , Н	Скорость скольжения $v$ , м/с	Диаметр шарика, мм	Тип ТСП	Коэффициент трения $f_{тр}$
Мисуоши	5,9	0,2	6	MoS <sub>2</sub> суспензионного нанесения	0,045
Брисуэла	6,0	0,2	6	MoSx — WC	0,054

С учетом почти полного совпадения нагрузочно-скоростных условий скольжения и антифрикционных характеристик — коэффициентов трения  $f_{тр}$  — (табл. 3) значение относительной интенсивности изнашивания шарового контртела  $I_{ш} = 0,13 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, полученное в экспериментах Мисуоши [17], приняли и для трибоиспытаний Брисуэла [13].

Для среднего ресурса ТСП MoSx — WC расчетный путь трения  $L$  составил 36 125,7 м. Объем износа шарикового контртела на этом пути  $V_{изн} = 0,000235$  мм<sup>3</sup>, площадь износа  $S = 0,0942$  мм<sup>2</sup>, а контактное давление  $p = 53,1$  МПа.

Анализ диапазонов применимости уравнения (1) показал, что расчетное контактное давление  $p = 53,1$  МПа выходит за их границы, а скорость скольжения  $v = 0,200$  м/с входит.

В связи с этим выполняли пересчет средней поверхностной температуры трения для условий трения пары с ТСП MoSx — WC по схеме, показанной на рис. 3.

На первом этапе корректировки пересчет поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  прово-

дили путем перехода из точки (т.) В к т. Е (соответствующей искомой скорости скольжения  $v = 0,200$  м/с) по кривой, соответствующей сечению поверхности  $T_{тр} = f(p, v)$  вертикальной плоскостью при  $p = 91$  МПа.

Результаты первого этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  приведены на рис. 4, где точки Е и В соответствуют таковому, показанному на рис. 3.

На втором этапе корректировки пересчет  $T_{тр}$  выполняли путем перехода из т. Е к т. И по кривой АБВГ. Этот переход осуществляли уменьшением ординаты т. Е относительно т. В. На это же значение снижали ординаты т. Ж и т. Д. Для т. З, соответствующей нулевому контактному давлению, ординату приняли равной  $T_{тр} = 0$  °С.

Сначала для основного уровня скорости скольжения  $v = 0,295$  м/с строили зависимость  $T_{тр} = f(p)$ , показанную на рис. 3 прямой АБВГ, описываемую уравнением

$$T_{тр} = -0,008p^2 + 2,1274p + 0,5624. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации зависимости (2)  $R^2 = 0,9970$ . Затем строили аналогичную зависимость для скорости скольжения  $v = 0,200$  м/с (прямая ДЕЖЗ), определяемую выражением

$$T_{тр} = -0,0062p^2 + 1,7975p + 0,4374. \quad (3)$$

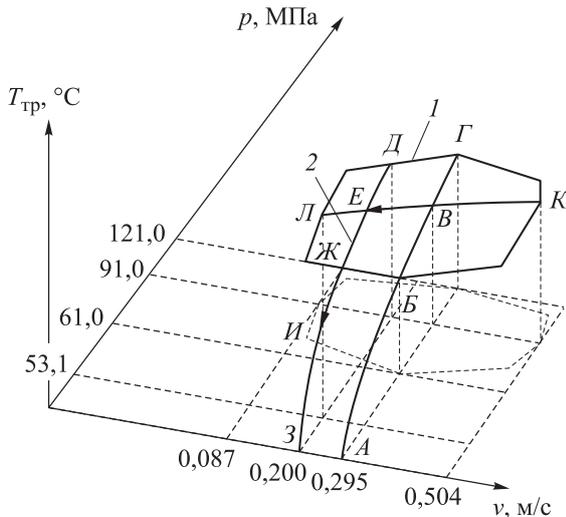


Рис. 3. Схема первого и второго этапов корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для условий испытаний пар трения с ТСП MoSx — WC

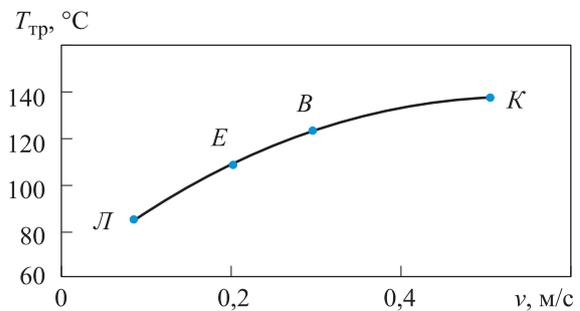


Рис. 4. Результаты первого этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для пары с ТСП MoSx — WC:

- —  $T_{тр} = f(v)$  для  $p = 91$  МПа; — — полиномиальная зависимость  $T_{тр} = f(v) = -282,19v^2 + 291,64v + 61,823$  ( $R^2 = 1$ ) для  $p = 91$  МПа

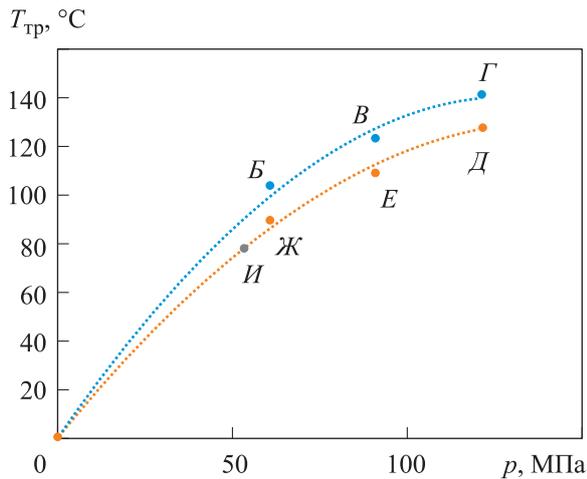


Рис. 5. Результаты второго этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для ТСП MoSx — WC:  
 • —  $T_{тр} = f(p)$  для  $v = 0,295$  м/с; • —  $T_{тр} = f(p)$  для  $v = 0,200$  м/с; • —  $T_{тр}$  для ТСП Брисуэла;  
 ..... — логарифмическая зависимость  $T_{тр} = f(p)$  для  $v = 0,295$  м/с; ..... — полиномиальная зависимость  $T_{тр} = f(p)$  для  $v = 0,295$  м/с

Коэффициент детерминации зависимости (3)  $R^2 = 0,9977$ .

Результаты второго этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для ТСП MoSx — WC приведены на рис. 5. Точки B и Ж соответствуют таковым, показанным на рис. 3.

Согласно уравнению (3), для контактного давления  $p = 53,1$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,200$  м/с поверхностная температура трения пары с MoSx — WC составила  $78,4$  °C.

**Орбитальные испытания ТСП<sub>МКС</sub> MoSx — WC на МКС.** Для оценки поверхностной температуры трения пары с ТСП<sub>МКС</sub> MoSx — WC требовалось определить контактную нагрузку,

которую рассчитывали в следующей последовательности.

При орбитальных испытаниях также использовали относительную интенсивность изнашивания шарового контртела  $I_{ш} = 0,13 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. Для среднего ресурса ТСП MoSx — WC путь трения  $L$  составил  $93\,535$  м. Объем износа шарикового контртела на этом пути  $V_{изн} = 0,000608$  мм<sup>3</sup>, площадь износа  $S = 0,151$  м, а контактное давление  $p = 33,0$  МПа.

Анализ диапазонов применимости уравнения (1) показал, что расчетное контактное давление  $p = 33,0$  МПа выходит за их границы, а расчетная скорость скольжения входит.

В связи с этим выполнен пересчет средней поверхностной температуры трения для условий трения пары с ТСП<sub>МКС</sub> MoSx — WC по схеме, аналогичной приведенной на рис. 3, но для условий трения рассматриваемого ТСП. По результатам расчета средняя поверхностная температура трения  $T_{тр} = 53$  °C.

**Сравнительная оценка ресурса пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных разными методами в условиях вакуума.** Для сравнения триботехнических характеристик ТСП на основе MoS<sub>2</sub> использованы результаты как отечественных исследователей [18–20], так и зарубежных [13, 17, 21]. Значения ресурса пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных разными методами в условиях вакуума, приведены в табл. 4.

С использованием приведенных в табл. 4 данных построен график термокорреляционной зависимости ресурса  $\tau$  пар трения ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных разными методами в условиях вакуума, от поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  (рис. 6). Установлено, что

Таблица 4

**Значения ресурса пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных разными методами в условиях вакуума**

Источник данных	Состав ТСП	Метод нанесения	$T_{тр}$ , °C	$f_{тр}$	Толщина ТСП, мкм	Ресурс $\tau$ , мин
[13]	MoSx — WC	Магнетронный	78,4	0,054	1,20	3068
	MoSx — WC (на орбите)		53,0	0,030	1,20	11 915
[17]	MoS <sub>2</sub> + полиамидимидная связка	Суспензионный	55,3	0,070	10,00 ± 4,00	8333
	MoS <sub>2</sub>	Магнетронный	73,8	0,070	1,00 ± 0,20	2284
[21]	MoS <sub>2</sub>	Высокочастотный	34,6	0,040	0,20	10 000
			112,0	0,020	0,65	475
[18, 19]	MoS <sub>2</sub> + связующее (ВНИИ НП 212)	Суспензионный	12,5	0,050	15,00 ± 5,00	7830

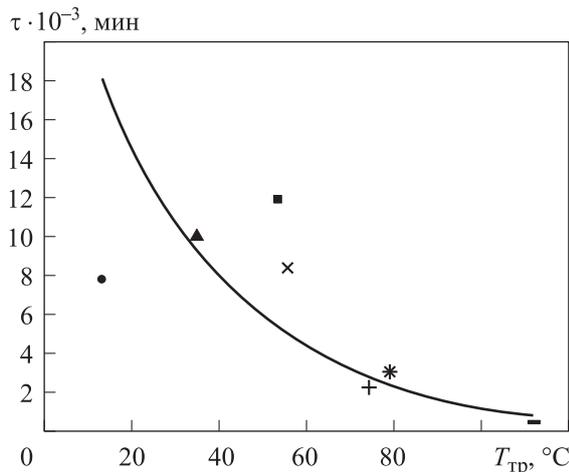


Рис. 6. Термокорееляционные зависимости ресурса  $\tau$  пар трения ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенных разными методами в условиях вакуума, от поверхностной температуры трения  $T_{тр}$ :  
 • — данные работ [18, 19]; ▲ и ■ — данные работы [21] для ТСП толщиной  $\delta = 0,20$  и  $0,65$  мкм; ■ и \* — данные работы [13] для орбитальных и наземных испытаний; × и + — данные работы [17] для ТСП суспензионного и магнетронного нанесения

наибольший ресурс  $\tau = 10\,000$  мин имеет ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  толщиной  $\delta = 0,20$  мкм, нанесенное высокочастотным методом, при поверхностной температуре трения  $T_{тр} = 34,6$  °C, коэффициенте трения  $f_{тр} = 0,040$ .

## Выводы

1. По результатам трибоиспытаний ТСП, нанесенных магнетронным методом, на прибо-

ре TriboLab, входящем в состав многофункционального оборудования EuTEF ESA европейской космической лаборатории Columbus, установлено следующее:

- средний ресурс пар трения с ТСП  $\text{MoSx} - \text{WC}$  ( $\tau = 11\,915$  мин) превосходит аналогичный параметр для наземных испытаний; наблюдаются значительные отклонения ресурса ТСП;
- коэффициент трения пар с ТСП  $\text{MoSx} - \text{WC}$  ( $f_{тр} = 0,03$ ) на 44,4 % выше, чем при наземных испытаниях.

2. По результатам трибоиспытаний, проведенных на вакуумной модели TriboLab в наземных условиях, выявлено следующее:

- средний ресурс пар трения с ТСП  $\text{MoSx} - \text{WC}$  ( $\tau = 3068$  мин) на 38 % больше, чем у ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  без примесей; наблюдаются значительные отклонения ресурса ТСП;
- средний коэффициент трения пар трения с ТСП  $\text{MoSx} - \text{WC}$  ( $f_{тр} = 0,054$ ) на 48 % больше, чем у ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  без примесей;
- начальный коэффициент трения существенно превышает среднее значение, что можно объяснить наличием окисленной поверхности перед испытанием.

3. Сравнительная оценка значений ресурса пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  без примесей, нанесенных разными методами в условиях вакуума, выявила, что наибольший ресурс ( $\tau = 10\,000$  мин) имеет ТСП высокочастотного нанесения толщиной  $0,2$  мкм при поверхностной температуре трения  $T_{тр} = 34,6$  °C и коэффициенте трения  $f_{тр} = 0,04$ .

## Литература

- [1] Богачев В.А., Маркачев Н.А., Петров Ю.А. и др. Износостойкие и антифрикционные материалы и покрытия, применяемые в узлах трения элементов конструкций космических аппаратов производства АО «НПО Лавочкина». *Труды МАИ*, 2023, № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176841>
- [2] Lince J.R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. *Lubricants*, 2020, vol. 8, no. 7, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants8070074>
- [3] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Lubricants for high-vacuum applications*. ASM, 1992. 150 p.
- [4] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant  $\text{MoS}_2$ -based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [5] Lince J.R., Fleischauer P.D. Solid lubricants. In: *Space vehicle mechanisms*. Wiley, 1998, pp. 172–188.
- [6] Christi R.I., Barnett G.C. Sputtered  $\text{MoS}_2$  lubrication system for spacecraft gimbal bearings. *Lub. Eng.*, 1978, vol. 34, no. 8, pp. 437–443.
- [7] Covino C.P. Parts coatings to improve machine performance. *Mod. Packa*, 1975, no. 9, pp. 60–62.
- [8] Covino C.P. Hard coat plus solid lube fights wear problems. *Metal Prog.*, 1975, no. 6, pp. 69–70.
- [9] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.

- [10] Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft. *Surf. Coat. Technol.*, 1992, vol. 54–55, part 2, pp. 435–441, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(07\)80062-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(07)80062-4)
- [11] Hiraoka N. Wear life of bonded MoS<sub>2</sub> film lubricant. In: *Tribology of machine elements*. Intech Open, 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99802>
- [12] Todd M.J., Bentall R.H. Lead film lubrication in vacuum. *Proc. 2nd Int. Conf. on Solid Lubrication*, ASLE SP-6, 1984, pp. 148–157.
- [13] Brizuela M., García-Luis A., Oñate J.I. et al. TRIBOLAB: An experiment on space tribology. *Proc. ESMATS*, 2009. URL: <https://esматы.eu/esматыpapers/pastpapers/pdfs/2009/brizuela.pdf>
- [14] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.
- [15] Sherbiny M.A., Halling J. Friction and wear of ion-plated soft metallic films. *Wear*, 1977, vol. 45, no. 2, pp. 211–220, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90075-8)
- [16] Хопин П.Н. Методика и результаты оценки эксплуатационных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования. *Трение и износ*, 2012, т. 33, № 1, с. 23–31.
- [17] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. Marcel Dekker, 2001. 399 p.
- [18] Ярош В.М., Моишеев А.А., Броновец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны. *Трение и износ*, 2003, т. 24, № 6, с. 626–635.
- [19] Хопин П.Н. Анализ испытаний пар трения с твердосмазочными покрытиями в наземно-космических условиях и прогнозирование трибологических характеристик. *Трение и износ*, 2018, т. 39, № 2, с. 175–183.
- [20] Хопин П.Н., Гриб В.В. Термокорреляционная оценка ресурса сопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными магнетронным и другими методами, в условиях вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 7, с. 72–80, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-7-72-80>
- [21] Spalvins T. *Lubrication with sputtered mos2 films*. NASA TM X- 67832. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. 1971.

## References

- [1] Bogachev V.A., Markachev N.A., Petrov Yu.A. et al. Wear-resistant and antifriction materials and coatings used in friction units of spacecraft structural elements manufactured by Lavochkin association. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176841> (in Russ.).
- [2] Lince J.R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. *Lubricants*, 2020, vol. 8, no. 7, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants8070074>
- [3] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Lubricants for high-vacuum applications*. ASM, 1992. 150 p.
- [4] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS<sub>2</sub>-based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [5] Lince J.R., Fleischauer P.D. Solid lubricants. In: *Space vehicle mechanisms*. Wiley, 1998, pp. 172–188.
- [6] Christi R.I., Barnett G.C. Sputtered MoS<sub>2</sub> lubrication system for spacecraft gimbal bearings. *Lub. Eng.*, 1978, vol. 34, no. 8, pp. 437–443.
- [7] Covino C.P. Parts coatings to improve machine performance. *Mod. Packa*, 1975, no. 9, pp. 60–62.
- [8] Covino C.P. Hard coat plus solid lube fights wear problems. *Metal Prog.*, 1975, no. 6, pp. 69–70.
- [9] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.
- [10] Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft. *Surf. Coat. Technol.*, 1992, vol. 54–55, part 2, pp. 435–441, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(07\)80062-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(07)80062-4)
- [11] Hiraoka N. Wear life of bonded MoS<sub>2</sub> film lubricant. In: *Tribology of machine elements*. Intech Open, 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99802>

- [12] Todd M.J., Bentall R.H. Lead film lubrication in vacuum. *Proc. 2nd Int. Conf. on Solid Lubrication*, ASLE SP-6, 1984, pp. 148–157.
- [13] Brizuela M., García-Luis A., Oñate J.I. et al. TRIBOLAB: An experiment on space tribology. *Proc. ESMATS*, 2009. URL: <https://esmat.eu/esmatpapers/pastpapers/pdfs/2009/brizuela.pdf>
- [14] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.
- [15] Sherbiny M.A., Halling J. Friction and wear of ion-plated soft metallic films. *Wear*, 1977, vol. 45, no. 2, pp. 211–220, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90075-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90075-8)
- [16] Khopin P.N. Method and results of assessment of the performance of friction pairs with solid lubricating coatings under various operating conditions. *Trenie i iznos*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 23–31. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 14–21, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010060>)
- [17] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. Marcel Dekker, 2001. 399 p.
- [18] Yarosh V.M., Moisheev A.A., Bronovets M.A. Study of friction and wear of materials in the open space in the lunar orbit. *Trenie i iznos*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 626–635. (In Russ.).
- [19] Khopin P.N. Test analysis of friction couples with solid lubricant coatings under ground-space conditions and prediction of tribological characteristics. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 175–183. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020071>)
- [20] Khopin P.N., Grib V.V. Thermal correlation assessment of the resource of interfaces with solid lubricating coatings based on MoS<sub>2</sub> applied by magnetron and other methods, for vacuum conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 7, pp. 72–80, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-7-72-80> (in Russ.).
- [21] Spalvins T. *Lubrication with sputtered mos2 films*. NASA TM X- 67832. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio. 1971.

Статья поступила в редакцию 25.12.2024

## Информация об авторах

**ХОПИН Петр Николаевич** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 1205 «Технология испытаний и эксплуатации». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

**МИШАКОВ Сергей Юрьевич** — аспирант кафедры 1202 «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: s.mishakov@mail.ru).

## Information about the authors

**KHOPIN Peter Nikolaevich** — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of 1205 Technology of Testing and Operation. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

**MISHAKOV Sergey Yurievich** — Postgraduate, Department of 1202 Technology of Manufacturing Production and Operation of Aircraft Engines. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: s.mishakov@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н., Мишаков С.Ю. Сравнительная оценка работоспособности твердосмазочных покрытий для функционирования в условиях вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 113–121.

### Please cite this article in English as:

Khopin P.N., Mishakov S.Y. Comparative assessment of the performance of hard-lubricating coatings for operation in vacuum conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 113–121.