

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.891:519.28

## Перспективные твердосмазочные покрытия для применения в условиях нормальной атмосферы и вакуума

П.Н. Хопин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## Promising solid lubricant coatings for use in the normal atmosphere and vacuum

P.N. Khopin

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Выявлены узлы трения космических летательных аппаратов, в которых использованы твердосмазочные покрытия. Анализ литературных данных трибологических испытаний твердосмазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$  зарубежных производителей Movic, Surftech, Hohman, Teer-Ti, CSEM-Ti и CSEM-AI показал, что наибольший ресурс в условиях сухой и влажной атмосферы при удовлетворительных антифрикционных свойствах обеспечивают пары трения с покрытием CSEM-Ti. Ресурс такого твердосмазочного покрытия, нанесенного методом несбалансированного вакуумно-ионного напыления (CFUBMSIP), для нормальных атмосферных условий больше в 10 раз, чем у аналогичного отечественного ВНИИ НП 212 суспензионного нанесения. Коэффициенты трения твердосмазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$  различных производителей в условиях сухого азота (0,01...0,07) существенно ниже, чем в условиях трения на воздухе (0,04...0,12). Установлено, что относительный износ покрытия на базе  $\text{MoS}_2 + \text{TiN}$ , нанесенного методом CFUBMSIP, с включением твердой фазы нитрида титана в среднем в 1000 раз меньше, чем у комбинированных твердосмазочных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ , полученных аналогичным методом с различными металлическими наполнителями и путем суспензионного или магнетронного напыления.

EDN: UEZWSP, <https://elibrary/uezwsp>

**Ключевые слова:** твердосмазочные покрытия, триботехнические характеристики, метод замкнутого поля, несбалансированное магнетронно-ионное распыление, сухой воздух, влажный воздух

The paper identifies the spacecraft friction units, where the solid lubricant coatings are used. Analysis of the literature data on tribological testing of the solid lubricant coatings based on  $\text{MoS}_2$  from various foreign manufacturers, i.e. Movic, Surftech, Hohman, Teer-Ti, CSEM-Ti and CSEM-AI, shows that the longest service life in the dry and humid atmosphere conditions with the satisfactory antifriction properties is provided by friction pairs with the CSEM-Ti coating. Service life of this solid lubricant coating applied by the closed field un-

balanced magnetron sputter ion plating (CFUBMSIP) technique is 10 times higher in the normal atmospheric conditions than that of a similar domestic VNII NP 212 suspension application. Friction coefficients of the solid lubricant coatings based on the MoS<sub>2</sub> from various manufacturers under dry nitrogen conditions (0.01...0.07) are significantly lower than under friction conditions in air (0.04...0.12). The paper establishes that relative wear of a coating based on the MoS<sub>2</sub> + TiN applied by the CFUBMSIP technique with inclusion of the titanium nitride solid phase is on average 1000 times lower than that of the combined solid lubricant coatings based on the MoS<sub>2</sub> obtained by a similar method with various metal fillers and by suspension or magnetron spraying.

EDN: UEZWSP, <https://elibrary/uezwsp>

**Keywords:** solid lubricant coatings, tribological characteristics, closed field method, unbalanced magnetron-ion sputtering, dry air, humid air

Твердые смазочные покрытия (ТСП) получили широкое распространение в узлах трения систем космических спутников. В работе [1] отмечено их применение для космических аппаратов (КА) разного типа:

- КА связи (скользящие кольца привода солнечной батареи, реактивное колесо);
- КА наблюдения (колесо импульса направленной антенны);
- метеорологических КА (карданные подшипники, скользящие кольца, колесо импульса солнечной батареи);
- навигационных КА (реактивные колеса, скользящие кольца привода солнечной батареи).

Помимо перечисленных узлов трения успешный вывод КА на орбиту обеспечивает штатное срабатывание механизмов ракеты-носителя. Указанные космические средства имеют различные механизмы расстыковки, благодаря которым КА отделяется от ракеты-носителя.

Также КА оснащены механизмами развертывания, позволяющими открывать на орбите подсистемы (например, антенные тарелки, солнечные панели и др.), которые часто складываются во время запуска с целью экономии объема. Для этих механизмов высвобождения или развертывания требуется смазка, обеспечивающая низкое трение (крутящий момент) при небольшом количестве циклов.

Несмотря на то, что спусковой механизм со смазкой обычно срабатывает только один раз в полете, во время предполетных наземных испытаний он должен это делать многократно (от 10 до 100 операций).

В то же время смазочный материал не может быть источником загрязнения паровой фазой, когда КА находится на орбите. Отсутствие терморегулирования может потребо-

вать, чтобы смазка функционировала в широком диапазоне температур. Смазка механизмов должна выдерживать воздействие излучения, электронов, протонов и атомов атомарного кислорода (на ближней околоземной орбите).

Наиболее распространенными смазочными материалами для указанных механизмов служат ТСП. Для выбора смазочного материала рассматривают следующие факторы:

- срок службы;
  - загрязнение (испарение в паровую фазу или образование твердых частиц);
  - чувствительность смазки к влаге во время предполетного хранения;
  - переносимость компонентов;
  - простота или надежность процедур нанесения смазки и стоимость [2].
- В работе [3] отмечены достоинства ТСП:
- отсутствие загрязнений;
  - возможность применения в условиях чрезвычайно высокой нагрузки;
  - стабильность при хранении;
  - совместимость с жидким кислородом;
  - использование в широком диапазоне температур;
  - устойчивость к воздействию ядерного и гамма-излучения;
  - отсутствие проблем с утилизацией;
  - обеспечение (в некоторых случаях) смазки на весь срок службы деталей.

К недостаткам ТСП относятся [3]:

- доступность ограниченного количества смазки;
- более высокий коэффициент трения, чем при гидродинамической смазке;
- потребность в средствах для эффективного удаления остатков износа;
- необходимость отвода теплоты из зоны контакта подшипников и зубчатых колес;

- потребность в более дорогостоящем повторном смазывании;
- необходимость избегать загрязнения во время нанесения покрытий и сборки деталей;

- ухудшение механических свойств некоторых материалов в цикле отверждения твердых пленок при повышенной температуре.

Методы нанесения ТСП описаны в табл. 1.

Таблица 1

Методы нанесения ТСП

ТСП	Метод	Примечание
Твердосмазочные пленки	Радиочастотное диодное напыление (rf diode sputtering)	Температура — 70...200 °С, скорость роста 25...35 нм/мин [4]
	Триодное распыление на постоянном токе (dc triode sputtering)	Температура 130...175 °С, скорость роста 60 нм/мин [4]
	Радиочастотное магнетронное напыление (rf magnetron sputtering)	Температура 24...70 °С, скорость роста 40...60 нм/мин [4]
	Натертые пленки (burnished films)	Измельчение в шаровой мельнице, натирание замшей, полирование кожей или проволочной щеткой. Трудно добиться стабильных результатов для простых устройств с одним управлением [5]
Трансферные пленки	Перенос смазочной пленки (обычно из фиксирующего материала) на материал сопряжения	Толщина переносимой пленки может зависеть от скорости работы. Образует большое количество частиц износа [5]
TUFRAM-покрытия	Превращение поверхности из Al в алюминиево-оксидную керамику. Затем на пористую поверхность наносится сцепленный слой фторуглерода для самосмазывания и устойчивости к коррозии [6, 7]	
NEDOX-покрытия	Поверхности смазывают твердым, пористым кобальт-никелевым или другим сплавом. Затем термообработывают фторуглеродным и/или сухим смазочным материалом с низким коэффициентом трения для обеспечения сцепления смазки [6, 7]	
Твердые лицевые покрытия	CVD	Газообразный носитель переносит материал покрытия на поверхность подложки. Основание обычно должно быть нагрето до высокой температуры (500 °С). Некоторые материалы, нанесенные с помощью этого метода, содержат тугоплавкие карбиды, бориды и нитриды [8]
Мягкие металлические пленки	Ионное покрытие	Покрытие наносится на поверхность потоком ионов аргона, которые проникают через поверхность отрицательно заряженной подложки. Ступенчатая или диффузная поверхность раздела между покрытием и подложкой обеспечивает хорошую адгезию [4]. Ионное покрытие обеспечивает лучшую адгезию и меньшее количество остатков износа (более устойчивый крутящий момент), чем пленки, нанесенные методом вакуумного напыления [9, 10]. Оптимальная толщина пленки 0,5 мкм [11]
	Гальванические покрытия	
	Вакуумное испарение	

К наиболее применяемым покрытиям относятся ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , в том числе с включениями различных металлов. В инструментальной промышленности получили распространение композитные ТСП  $\text{MoS}_2 + \text{Ti}$ , обозначаемые как  $\text{MoST}$ , и ТСП другого состава, получаемые методом несимметричного магнетронного распыления в замкнутом поле [12]. Эти покрытия наносят на режущий инструмент, штамповую оснастку, используют в автомобильной промышленности при крупносерийном производстве.

Традиционно для узлов трения автономной смазки применяют отечественные ТСП суспензионного напыления ВНИИ НП, ВАП и зарубежные, например, фирмы Molykote [13].

В работе [14] приведены результаты сравнительной оценки триботехнических характеристик пар трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  ВНИИ НП 212 и с ТСП<sub>CFUBMSIP</sub>, нанесенными методом замкнутого поля несбалансированного магнетронно-ионного распыления (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating — CFUBMSIP), комбинированного состава  $\text{MoS}_2 + \text{Ti}$ ,  $\text{MoS}_2 + \text{Zr}$ ,  $\text{MoS}_2 + \text{Cr}$  и  $\text{MoS}_2 + \text{W}$ .

Установлено, что в нормальных атмосферных условиях (НАУ) при относительной влажности воздуха 41 %, т. е. в режиме трения, соответствующем контактной температуре трения  $T_{\text{тр}} = 157^\circ\text{C}$ , у ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> ресурс на 42,1 % больше, а коэффициент трения в среднем в 2 раза меньше, чем у ТСП ВНИИ НП 212. Среднее значение коэффициента снижения ресурса для ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> при переходе от НАУ к воде — 2,98.

В НАУ и воде коэффициент трения ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> составлял 0,02...0,04, в масляной среде — 0,03...0,08. ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> на основе чистого  $\text{MoS}_2$  в НАУ, воде и масляной среде оказались практически неработоспособным.

В то же время в работе [15] отмечены высокие триботехнические свойства ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> на основе  $\text{MoS}_2$  как для НАУ, так и для вакуума.

ТСП, предназначенные для узлов трения, функционирующих в вакууме, следует опробовать и хранить в условиях земной атмосферы, причем не исключая воздействие влажности. Такие исследования, описанные в работе [16], также проанализированы в данной статье.

Цель работы — сравнительная оценка триботехнических характеристик нанесенных разными методами ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , в том числе ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> и ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума и НАУ при разной влажности.

**Материалы и инструменты.** В работе [16] исследованы шесть различных покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ , выпускаемых пятью производителями — Movic, Surftech, Hohman, Teer и CSEM (табл. 2). Покрытия наносили на диск трибометра, функционирующего по схеме штифт — диск (рис. 1, а), и на кольцо трибометра, работающего по схеме блок — кольцо (рис. 1, б).

Диски, блоки и кольца изготавливали из нержавеющей стали 440С с твердостью по Роквеллу 57...59 HRC. Диски притирали и полировали до шероховатости поверхности  $0,040 \pm 0,015$  мкм по средней осевой линии.

Для схемы трения штифт — диск держатель штифта модифицировали, чтобы удерживать шарик радиусом 4,76 мм из стали 440С, который имел ту же шероховатость поверхности, что и диск. Твердость шариков составляла 60 HRC. Контактная нагрузка  $N = 9,8$  Н, частота

Таблица 2

Характеристики ТСП на основе  $\text{MoS}_2$

ТСП			Основная добавка
Производитель	Обозначение	Толщина, мкм	
Movic	Movic	0,6	—
Surftech	Surftech	0,3	—
Hohman	Hohman	1,2	Трехокись сурьмы
Teer Coatings Limited	Teer-Ti	1,2	Титан
CSEM	CSEM-Ti	2,4	Титан
CSEM	CSEM-Al	3,5	Алюминий

*Примечание.* Знак «—» указывает на отсутствие добавки.

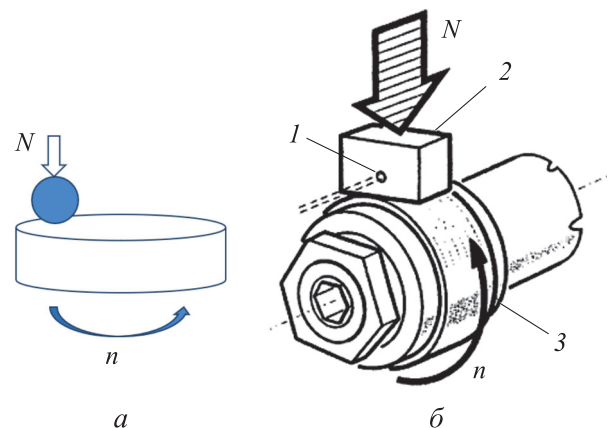


Рис. 1. Схемы пар трения:  
а — штифт — диск; б — блок — кольцо  
(1 — отверстие для термопары; 2 — блок; 3 — кольцо)

вращения  $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ . Для диаметров вращения на диске 44...63 мм скорость скольжения  $v = 0,46...0,63 \text{ м/с}$ .

Для схемы трения блок — кольцо диаметр кольца  $d_k = 50 \text{ мм}$ , ширина кольца  $b_k = 10 \text{ мм}$ , ширина блока  $b_{бл} = 6 \text{ мм}$ . Контактная нагрузка  $N = 225 \text{ Н}$ , частота вращения  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ .

Так как способ нанесения ТСП<sub>CFUBMSIP</sub> на основе MoS<sub>2</sub>, содержащих титан, изобретен компанией Teer Coatings Limited [14], она имеет патентные права на это покрытие. Компания CSEM получила лицензию на нанесение покрытия с использованием этого процесса. Следовательно, эти покрытия в основном очень похожи. Как и следовало ожидать, основное различие между двумя покрытиями заключается в том, что покрытие CSEM-TiC содержит больше титана, чем покрытие Teer-TiC.

В работе [15] условия проведения трибологических испытаний были следующими. Схема трения соответствовала рис. 1, а. Шарик диаметром  $d_{ш} = 6 \text{ мм}$  изготавливали из керамики на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Контактная нагрузка  $N = 5 \text{ Н}$ , скорость скольжения  $v = 0,1 \text{ м/с}$ .

Используемый способ нанесения ТСП — несимметричное магнетронное радиочастотное неактивное распыление. Схема мишени для получения комбинированного ТСП на базе MoS<sub>2</sub> и TiN (далее ТСП<sub>MoSx+TiN</sub>) приведена на рис. 2, а условия осаждения и состав ТСП — в табл. 3 и на рис. 3. Условия осаждения: температура трения — 280 °С, контактное давление  $p = 0,4 \text{ МПа}$ .

Структура комбинированного ТСП, испытанного в работе в различных условиях функционирования [15], приведена на рис. 3.

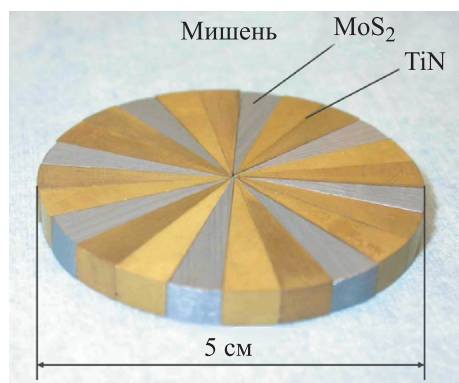


Рис. 2. Схема мишени для получения комбинированного ТСП<sub>MoSx+TiN</sub>

Таблица 3

Химический состав к ТСП<sub>MoSx+TiN</sub>

Количество сегментов MoS <sub>x</sub>	Содержание в ТСП, %			
	Mo	S	TiN	MoS <sub>x</sub>
2	14	20	66	17,5
3	17	34	49	25,8
4	25	38	37	40,3
5	25	46	29	46,3
6	30	48	23	56,6
8	28	54	18	60,9

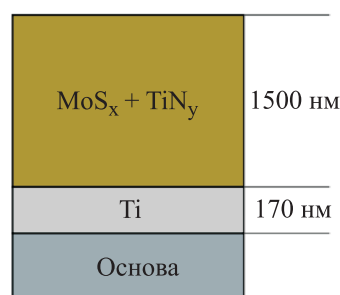


Рис. 3. Структура комбинированного ТСП<sub>MoSx+TiN</sub>

**Результаты исследований и их обсуждение.** Исследования на трибометре штифт — диск [16]. Эксперименты проводили в сухом и влажном (при относительной влажности 50 %) воздухе. Результаты испытания ТСП на основе MoS<sub>2</sub> различных зарубежных производителей по схеме штифт — диск приведены в табл. 4, где  $f_{тр}$  — коэффициент трения в установившемся режиме;  $W$  — ресурс ТСП (число циклов нагружения);  $I_{шт}$  и  $I_{ТСП}$  — относительный износ штифта и ТСП.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, позволил установить следующее:

- наибольший ресурс при удовлетворительных антифрикционных свойствах обеспечивают пары трения с ТСП CSEM-Ti:

- в сухом воздухе число циклов нагружения  $W = 1440 \cdot 10^3$  при коэффициенте трения  $f_{тр} = 0,06$ ;

- во влажном воздухе  $W = 625 \cdot 10^3$  (т. е. число циклов снижается в 2,3 раза) и  $f_{тр} = 0,11$  (коэффициент трения повышается в 1,83 раза);

- при больших значениях коэффициента трения ресурс ТСП CSEM-Al близок к таковому для ТСП CSEM-Ti;

- остальные ТСП показали неудовлетворительный ресурс функционирования.

Таблица 4

Результаты испытания ТСП на основе MoS<sub>2</sub> по схеме штифт — диск в сухом и влажном воздухе

Марка ТСП	$f_{тр}$	$W \cdot 10^{-3}$	$I_{шт} \cdot 10^{18}, \text{м}^3/\text{м}$	$I_{ТСП} \cdot 10^{16}, \text{м}^3/\text{м}$
Movic	0,15/0,04	$7 \pm 3/120 \pm 3$	$700 \pm 3/4 \pm 200$	–
Surftech	0,04/0,04	$39 \pm 6/41 \pm 7$	$15 \pm 12/3 \pm 1$	–
Hohman	0,12/0,04	$76 \pm 46/100 \pm 26$	$145 \pm 135/24 \pm 6$	–
Teer-Ti	0,09/0,04	$55 \pm 10/361 \pm 15$	$60 \pm 20/3 \pm 1$	$107 \pm 35/16 \pm 8$
CSEM-Ti	0,11/0,06	$625 \pm 100/1440 \pm 440$	$30 \pm 10/3 \pm 1$	$44 \pm 6/11 \pm 5$
CSEM-Al	0,12/0,08	$400 \pm 5/1248 \pm 2052$	$300 \pm 120/3 \pm 2$	$103 \pm 55/22 \pm 8$

Примечание. В числителе дроби указаны значения для влажного воздуха, в знаменателе — для сухого.

Сравнительную оценку триботехнических параметров ТСП отечественного производства на основе MoS<sub>2</sub> проводили по предложенной ранее методике при аналогичной температуре трения  $T_{тр}$ , для расчета которой использовали выражение [17]

$$T_{тр} = 36,49 + 132,23v + 0,535p + 0,234pv - 47,94v^2 - 2,094 \cdot 0,001p^2. \quad (1)$$

Выражение (1) справедливо для исследованных диапазонов контактного давления  $p = 23,1 \dots 133,7$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,096 \dots 1,224$  м/с.

Чтобы оценить температуру трения  $T_{тр}$ , необходимо определить контактное давление  $p$  в условиях трения ТСП CSEM-Ti. Для условий сухого трения с учетом относительного износа шарика, указанного в табл. 4, объем продуктов износа  $V$  составил  $0,000726$  мм<sup>3</sup>, а площадь износа  $S = 0,208$  мм<sup>2</sup>. Тогда при контактной нагрузке  $N = 9,8$  Н контактное давление  $p = 47,1$  МПа.

Ввиду отсутствия точного значения скорости скольжения, ее рассчитывали как среднее значение для диапазона  $v = 0,46 \dots 0,63$  м/с:  $v_{ср} = 0,56$  м/с.

С учетом того, что контактное давление  $p = 47,1$  МПа и скорость скольжения  $v = 0,56$  м/с входят в исследованные диапазоны для выражения (1) расчетная контактная температура трения  $T_{тр} = 122,1$  °С.

Тогда ресурс ТСП ВНИИ НП 212 [18]

$$\tau = 9 \cdot 10^6 \cdot T_{тр}^{-1,969} = 700 \text{ мин}. \quad (2)$$

Согласно данным, приведенным в табл. 4, число циклов нагружения ТСП CSEM-Ti  $W = 1440 \cdot 10^3$ , что при частоте вращения  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> соответствует ресурсу  $\tau = 7200$  мин

в сухом воздухе. Таким образом, в НАУ у ТСП CSEM-Ti ресурс в 10 раз больше, чем у ТСП ВНИИ НП 212.

Сравнение антифрикционных характеристик ТСП ВНИИ НП 212 и ТСП CSEM-Ti проводили с использованием термодинамической зависимости [19]

$$f_{тр} = 0,0197 + 8,881 T_{тр}^{-1}. \quad (3)$$

При контактной температуре трения  $T_{тр} = 122,1$  °С расчетный коэффициент трения ТСП ВНИИ 212 составил  $0,0924$ , что в 1,54 раза больше, чем для ТСП<sub>CSEM-Ti</sub> ( $0,06$ ).

## Исследования на трибометре блок — диск [16].

Исследования проводили в среде сухого азота, моделирующей условия вакуума. Результаты испытания ТСП на основе MoS<sub>2</sub> различных зарубежных производителей по схеме блок — диск приведены в табл. 5, где О — отказ.

Анализ данных, приведенных в табл. 5, выявил следующее:

- результаты исследования — нестабильные; например, наибольший ресурс ТСП<sub>CSEM-Ti</sub> в условиях воздуха при нанесении покрытия только на диск оказывается в 26 раз меньше, чем при напылении ТСП и на диск, и на блок;
- лучшим ТСП при нанесении ТСП только на диск является ТСП Hohman, которое при трении в паре с ТСП, нанесенными на обе поверхности, оказывается неработоспособным;
- коэффициент трения в среде сухого азота существенно ниже, чем на воздухе.

На основании изложенного можно сделать вывод о перспективности нанесения ТСП на обе контактирующие поверхности и о необходимости дополнительных исследований ТСП Hohman с окисью сурьмы.

Таблица 5

Результаты испытания ТСП на основе MoS<sub>2</sub> по схеме блок — диск в среде сухого азота

ТСП на основе MoS <sub>2</sub>	$f_{тр}$	$W \cdot 10^3$	$I_{ТСП} \cdot 10^{18}, \text{ м}^3/\text{м}$
Movic	0,01/0,01	1166 ± 45/360 ± 70	2 ± 0,5/190 ± 160
Surftech	0,04/-	0,6 ± 0,4/-	-/-
Hohman	0,01/-	5556 ± 3570/-	1,2 ± 1,0/-
Teer-Ti	0,03/-	303 ± 110/-	9,5 ± 0,7/-
CSEM-Ti	0,02/0,02	323 ± 321/6132 ± 950	24 ± 23,955/0,7 ± 0,3
CSEM-Al	0,07/0	0,3 ± 0,1/0	-/0

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для ТСП, нанесенного на диск, в знаменателе — для ТСП, напыленного и на диск, и на блок.

**Результаты трибологических испытаний комбинированных ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>.** В работе [15] исследованы перспективные ТСП, нанесенные методом несимметричного магнетронного радиочастотного неактивного распыления.

Результаты трибологических испытаний, проведенных по схеме диск — шар, приведены на рис. 4, где  $I$  — критерий относительного износа,  $I = V/NL$  ( $L$  — путь трения).

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, показал следующее:

- в вакууме наименьший относительный износ ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>  $I = 0,5 \cdot 10^{-11} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$  получен при 17,5%-ном содержании MoS<sub>x</sub>;
- в НАУ при относительной влажности 50 % наименьший относительный износ ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>  $I = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$  также получен при 17,5%-ном содержании MoS<sub>x</sub>; т. е. при переходе от влажной воздушной атмосферы к условиям вакуума наблюдается повышение относительного износа в среднем в 2 раза.

Эффективность ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> оценивали по критерию относительного износа  $I$  путем сравнения с другими ТСП:

- ТСП на основе MoS<sub>2</sub> + Ti, MoS<sub>2</sub> + Zr, MoS<sub>2</sub> + Cr и MoS<sub>2</sub> + W (далее ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Ti</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Zr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Cr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+W</sub> соответственно), описанных в работах [20–22] для НАУ при относительной влажности 41 %;

- ТСП на основе MoS<sub>2</sub> суспензионного (СН) и магнетронного (МН) нанесения (далее ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>СН</sub> и ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>МН</sub>), описанных в работах [23, 24].

Условия и результаты указанных трибологических испытаний различных ТСП — ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> [15], ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Ti</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Zr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Cr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+W</sub> [20–22] в НАУ и ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>СН</sub> и ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>МН</sub> в вакууме и [23, 24] — приведены в табл. 6.

Анализ данных, приведенных в табл. 6, показал, что критерий относительного износа ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>, нанесенного методом CFUBMSIP,

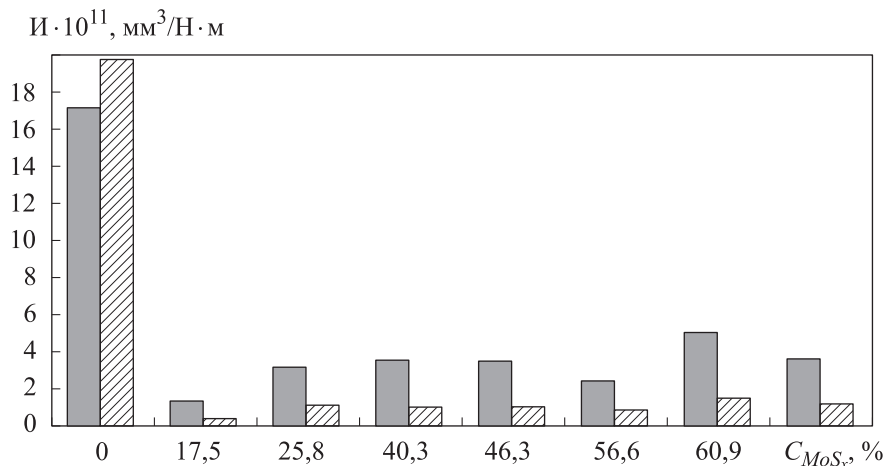


Рис. 4. Зависимость критерия относительного износа  $I$  от содержания MoS<sub>x</sub> в ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>  $C_{MoS_x}$  для вакуума (■) и НАУ при относительной влажности 50 % (▨)



Таблица 6

## Триботехнические характеристики и результаты испытаний различных ТСП

Тип ТСП	Параметры трения					Шарик		Критерий относительного износа И, мм <sup>3</sup> /Н·м
	Возвратно-поступательное движение	Скольжение	W	N, Н	v, м/с	Материал	d <sub>ш</sub> , мм	
ТСП <sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>	–	+	–	5	0,100	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	1·10 <sup>-11</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub>+Ti</sub>	+	–	10·10 <sup>3</sup>	100,0	0,025	ВК6	5	4,17·10 <sup>-8</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub>+Zr</sub>	+	–	10·10 <sup>3</sup>	100,0	0,025	ВК6	5	1,8·10 <sup>-8</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub>+Cr</sub>	+	–	10·10 <sup>3</sup>	100,0	0,025	ВК6	5	4,61·10 <sup>-8</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub>+W</sub>	+	–	10·10 <sup>3</sup>	100,0	0,025	ВК6	5	3,17·10 <sup>-8</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub> СН</sub>	–	+	> 10 <sup>6</sup>	5,9	0,200	440С	6	6·10 <sup>-8</sup>
ТСП <sub>MoS<sub>2</sub> МН</sub>	–	+	> 0,27·10 <sup>6</sup>	5,9	0,200	440С	6	9·10 <sup>-8</sup>

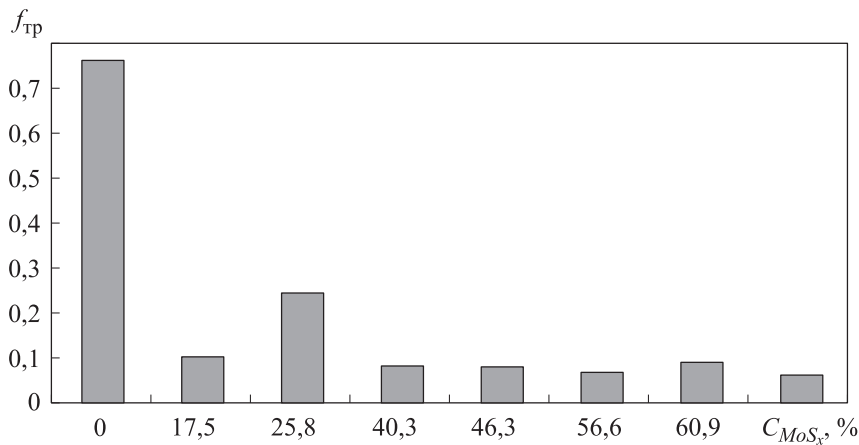


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  от содержания  $MoS_x$  в ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>  $C_{MoS_x}$  для НАУ при относительной влажности 50 %

в среднем в 1000 раз меньше, чем у комбинированных ТСП на основе  $MoS_2$  с различными металлическими наполнителями, нанесенных аналогичным методом, и ТСП СН и МН. Это можно объяснить следующими причинами:

- в НАУ отсутствием числа циклов нагружения для ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> и меньшей в 20 раз нагрузкой (для ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub>  $N = 5$  Н, для ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Ti</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Zr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+Cr</sub>, ТСП<sub>MoS<sub>2</sub>+W</sub>  $N = 100$  Н);
- наличием в составе ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> карбидной фазы TiN высокой твердости.

Приведенная в работе [15] диаграмма изменения антифрикционных характеристик ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> — зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  от содержания  $MoS_x$  в ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> для НАУ при относительной влажности 50 % — показана на рис. 5. Видно, что коэффициент трения для ТСП<sub>MoS<sub>x</sub>+TiN</sub> с различным содержанием  $MoS_x$  в среднем составляет 0,06...0,10, что совпадает с диапазоном изменения антифрик-

ционных характеристик ТСП на основе  $MoS_2$  различных зарубежных производителей (см. табл. 5).

## Выводы

1. Выявлены узлы трения с использованием ТСП для КА связи (скользящие кольца привода солнечной батареи, реактивное колесо), КА наблюдения (колесо импульса направленной антенны), метеорологических КА (карданные подшипники, скользящие кольца, колесо импульса солнечной батареи), навигационных КА (реактивные колеса, скользящие кольца привода солнечной батареи).

2. Анализ данных литературных источников по трибологическим испытаниям ТСП на основе  $MoS_2$  (Movic, Surftech, Hohman, Teer-Ti, CSEM-Ti и CSEM-AI) показал, что в сухом и влажном воздухе при удовлетворительных ан-



триффрикционных свойствах ресурс пары трения с ТСП<sub>CSEM-Ti</sub> в 10 раз больше, чем у ТСП ВНИИ НП 212.

3. При температуре трения 122,1 °С расчетный коэффициент трения ТСП ВНИИ 212 (0,0924) в 1,54 раза выше, чем значение этого параметра в установившемся режиме для ТСП<sub>CSEM-Ti</sub> (0,06).

4. Показана перспективность нанесения ТСП на обе контактирующие поверхности и необходимость проведения дополнительных исследований ТСП Hohman, основным компонентом которого является окись сурьмы.

5. Наименьший относительный износ ТСП<sub>MoSx+TiN</sub> получен при 17,5%-ном содержании MoS<sub>x</sub>. В вакууме он составил  $0,5 \cdot 10^{-11}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, в НАУ при относительной влажности 50 % —  $1,0 \cdot 10^{-11}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, т. е. при переходе от влажного воздуха к вакууму в среднем повысился в 2 раза.

6. Относительный износ ТСП<sub>MoSx+TiN</sub>, нанесенного методом CFUBMSIP, в среднем оказался в 1000 раз меньше, чем у комбинированных ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с различными металлическими наполнителями, напыленными аналогичным методом, и у ТСП СН или МН.

## Литература

- [1] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Applications of solid lubricant films in spacecraft*. Report TR-92(2935)-6. The Aerospace Corporation, 1994. 22 p.
- [2] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Lubricants for high-vacuum applications*. ASM, 1992. 150 p.
- [3] Kannel J.W., Lowry J.A., Dufrane K.F. *Lubricant selection manual*. Report NASA-CR-184363. NASA Marshall Space Flight Center, 1991. 45 p.
- [4] Fleischauer P.D., Hilton M.R., Bauer R. *Effects of microstructure and adhesion on performance of sputter-deposited MoS<sub>2</sub> solid lubricant coatings*. Report TOR-0090(5064)-2. The Aerospace Corporation, 1990. 27 p.
- [5] Christi R.I., Barnett G.C. Sputtered MoS<sub>2</sub> lubrication system for spacecraft gimbal bearings. *Lub. Eng.*, vol. 34, no. 8, p. 437.
- [6] Covino C.P. Parts coatings to improve machine performance. *Mod. Packa*, 1975, no. 9, pp. 60–62.
- [7] Covino C.P. Hard coat plus solid lube fights wear problems. *Metal Prog.*, 1975, no. 6, pp. 69–70.
- [8] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.
- [9] 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)
- [10] Thomas A., Todd M.L., Garnham A.L. Current status of lead lubrication of ball bearings. *Proc. Second Space Tribology Workshop*. ESTL, 1980, pp. 101–110.
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2007. 54 с.
- [14] Хопин П.Н., Сильченко О.Б. Сравнительная оценка триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий, нанесенных методом замкнутого поля несбалансированного магнетронно-ионного распыления, для различных условий функционирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 1, с. 54–65, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-54-65>
- [15] Spassov V., Hoogerwerf A. Hard self-lubricating nanocomposite PVD coatings for space and terrestrial applications. *5th ESA Round Table on Micro/Nano Technologies for Space*. CSEM Swiss Center for Electronics and Microtechnology, 2005. 28 p.
- [16] Fusaro R.L., Siebert M. Comparison of several different sputtered molybdenum disulfide coatings for use in space applications. *Proc. 36<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symp.*, 2000, pp. 305–318.

- [17] 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.
- [18] Хопин П.Н. Термокорреляционный подход к оценке работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями для условий нормальной атмосферы. *Трибология — машиностроению. Тез. докл. XI межд. науч.-тех. конф.* Москва, ИМАШ, 2016, с. 254–255.
- [19] Хопин П.Н., Попов О.В., Комаров В.А. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в зависимости от температурного фактора. *Трение и износ*, 1985, т. 6, № 6, с. 1109–1116.
- [20] Teer D.G., Hampshire J., Fox V. et al. The tribological properties of MoS<sub>2</sub>/metal composite coatings deposited by closed field magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 94–95, pp. 572–577, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00498-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00498-2)
- [21] Teer D.G., Hampshire J.H., Bellido V. Improvements in and relating to methods for improving the sputter desposition of metal-sulphur coatings, e.g. molybdenum disulphide coatings and to improved coatings. EU Patent EU 96924987.9, 1996.
- [22] Renevier N.M., Fox V.C., Teer D.G. et al. Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS<sub>2</sub>/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Surf. Coat. Technol.*, 2000, vol. 127, no. 1, pp. 24–37, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00538-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00538-7)
- [23] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. CRC Press, 2001. 414 p.
- [24] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K., et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. Glenn Research Center, 1999. 30 p.

## References

- [1] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Applications of solid lubricant films in spacecraft*. Report TR-92(2935)-6. The Aerospace Corporation, 1994. 22 p.
- [2] Hilton M.R., Fleischauer P.D. *Lubricants for high-vacuum applications*. ASM, 1992. 150 p.
- [3] Kannel J.W., Lowry J.A., Dufrane K.F. *Lubricant selection manual*. Report NASA-CR-184363. NASA Marshall Space Flight Center, 1991. 45 p.
- [4] Fleischauer P.D., Hilton M.R., Bauer R. *Effects of microstructure and adhesion on performance of sputter-deposited MoS<sub>2</sub> solid lubricant coatings*. Report TOR-0090(5064)-2. The Aerospace Corporation, 1990. 27 p.
- [5] Christi R.I., Barnett G.C. Sputtered MoS<sub>2</sub> lubrication system for spacecraft gimbal bearings. *Lub. Eng.*, vol. 34, no. 8, p. 437.
- [6] Covino C.P. Parts coatings to improve machine performance. *Mod. Packa*, 1975, no. 9, pp. 60–62.
- [7] Covino C.P. Hard coat plus solid lube fights wear problems. *Metal Prog.*, 1975, no. 6, pp. 69–70.
- [8] Buckle D.H. *Tribological systems as applied to aircraft engines*. Report NASA-TM-86965. NASA Lewis Research Center, 1985. 22 p.
- [9] Sherbiney 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)
- [10] Thomas A., Todd M.L., Garnham A.L. Current status of lead lubrication of ball bearings. *Proc. Second Space Tribology Workshop*. ESTL, 1980, pp. 101–110.
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruksionnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Structural and lubricating materials of space mechanisms]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2007. 54 p. (In Russ.).
- [14] Khopin P.N., Silchenko O.B. A comparative assessment of tribotechnical characteristics of solid lubricant coatings deposited using the closed field unbalanced magnetron sputtering

- ion plating technique for various operating conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 1, pp. 54–65, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-1-54-65> (in Russ.).
- [15] Spassov V., Hoogerwerf A. Hard self-lubricating nanocomposite PVD coatings for space and terrestrial applications. *5th ESA Round Table on Micro/Nano Technologies for Space*. CSEM Swiss Center for Electronics and Microtechnology, 2005. 28 p.
- [16] Fusaro R.L., Siebert M. Comparison of several different sputtered molybdenum disulfide coatings for use in space applications. *Proc. 36th Aerospace Mechanisms Symp.*, 2000, pp. 305–318.
- [17] 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.).
- [18] Khopin P.N. [Thermo-correlation approach to estimation of serviceability of friction pairs with hard-lubricating coatings for conditions of normal atmosphere]. *Tribologiya — mashinostroeniye. Tez. dokl. XI mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Tribology to Machine Building. Abs. XI Int. Sci.-Tech. Conf.] Moscow, IMASH Publ., 2016, pp. 254–255. (In Russ.).
- [19] Khopin P.N., Popov O.V., Komarov V.A. Experimental evaluation of efficiency of friction pairs with hard lubricant coating depending on the temperature factor. *Trenie i iznos*, 1985, vol. 6, no. 6, pp. 1109–1116. (In Russ.).
- [20] Teer D.G., Hampshire J., Fox V. et al. The tribological properties of MoS<sub>2</sub>/metal composite coatings deposited by closed field magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 94–95, pp. 572–577, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00498-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00498-2)
- [21] Teer D.G., Hampshire J.H., Bellido V. Improvements in and relating to methods for improving the sputter desposition of metal-sulphur coatings, e.g. molybdenum disulphide coatings and to improved coatings. EU Patent EU 96924987.9, 1996.
- [22] Renevier N.M., Fox V.C., Teer D.G. et al. Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS<sub>2</sub>/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Surf. Coat. Technol.*, 2000, vol. 127, no. 1, pp. 24–37, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00538-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00538-7)
- [23] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. CRC Press, 2001. 414 p.
- [24] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K., et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. Glenn Research Center, 1999. 30 p.

Статья поступила в редакцию 24.11.2023

## Информация об авторе

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

## Information about the author

**KHOPIN Petr Nikolaevich** — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Manufacturing and Operation of Aircraft Engines. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н. Перспективные твердосмазочные покрытия для применения в условиях нормальной атмосферы и вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 95–105.

### Please cite this article in English as:

Khopin P.N. Promising solid lubricant coatings for use in the normal atmosphere and vacuum. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 7, pp. 95–105.