

УДК 621.891:519.28

doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-73-86

Исследование механизмов трения и оценка трибологических характеристик твердосмазочных покрытий, нанесенных разными методами

П.Н. Хопин

МАИ

On the Friction Mechanisms and Assessment of Tribological Characteristics of Solid Lubricant Coatings of Various Application Methods

P.N. Khopin

Moscow Aviation Institute

Проанализирована динамика изнашивания твердосмазочных покрытий (ТСП), нанесенных суспензионным, магнетронно-высокочастотным и диффузионным методами. Приведены расчетные зависимости для оценки их триботехнических характеристик. Установлено, что ресурс ТСП на основе MoS_2 высокочастотного нанесения в рассмотренных диапазонах варьирования поверхностной температуры незначительно отличается от такового для ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП 212. Износ диффузионных ТСП Димолит-4 (М-804) при установившемся режиме трения составляет 34 мкм. Интенсивность изнашивания диффузионных ТСП М-804 в условиях вакуума при скорости скольжения 0,2 м/с и повышении контактного давления с 1 до 8 МПа увеличивается в 2 раза и в среднем в 4,5 раза выше, чем у пар трения с ТСП ВНИИ НП 212. Антифрикционные характеристики диффузионных ТСП в установившемся режиме трения до температур 600 °С несколько превышают таковые для ТСП со связующими. С повышением температуры нагрева до предельного значения (800 °С) коэффициент трения диффузионных ТСП М-801 и М-810 (на основе NbS_2) снижается до 0,03...0,04.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, магнетронно-высокочастотное нанесение, триботехнические характеристики, нормальные атмосферные условия

The article analyzes the wear dynamics of solid lubricant coatings (SLC) of suspension, magnetron-high-frequency and diffusion methods of application. Calculated dependences are presented to assess the tribotechnical characteristics of the SLC. It was found that the service life of SLC based on MoS_2 HF application in the considered ranges of surface temperature variations differs slightly from the that of SLC suspension application VNI NP 212. The wear of diffusion SLC M804 (Dimolit-4) in the steady-state friction mode is 34 μm . The wear rate of diffusion SLC M804 under vacuum conditions at a sliding speed of $V = 0.2$ m/s with the increase in contact pressure from 1 to 8 MPa increases by a factor of 2 and is on average 4.5 times higher than that of friction pairs with SLC VNI NP 212. Anti-friction characteristics of diffusion SLC in steady state friction modes at temperatures up to 600 °C were slightly higher than the similar characteristics for SLC with a binder. With an increase in heating temperatures to the limiting value of 800 °C, the fric-

tion coefficient of the diffusion SLC M801 and M810 (based on NbS₂) decreases to the values of $f_{fr} = 0.03-0.04$.

Keywords: solid lubricant coatings, magnetron-high-frequency application, tribotechnical characteristics, normal atmosphere

Твердосмазочные покрытия (ТСП), нанесенные разными методами [1–3], получили широкое распространение в авиакосмической, автомобилестроительной, металлургической и других отраслях промышленности. Для узлов трения, функционирующих в условиях вакуума (УВ), применяют ТСП на основе дисульфида молибдена (MoS₂) [4, 5]. Согласно результатам исследований [5], температура деструкции MoS₂ в нормальных атмосферных условиях (НАУ) составляет 450 °С, а в УВ достигает 1100 °С и зависит от степени разряжения.

К недостаткам дисульфида молибдена, используемого в качестве наполнителя ТСП, относится окисляемость как в НАУ [6], так и в УВ [7]. В связи с этим перспективными соединениями являются диселениды молибдена, у которых отсутствует явление возрастания коэффициента трения $f_{тр}$ [8, 9].

Самыми распространенными методами нанесения ТСП являются: суспензионный, магнетронный, радиочастотный, с диффузионной обработкой основы (для стальных и титановых подслоев — с предварительным нанесением подслоя). Каждый метод нанесения ТСП имеет отличительные особенности, а в некоторых случаях происходит по различным механизмам трения.

Цель работы — изучение динамики изнашивания ТСП, нанесенных разными методами, и прогнозирование триботехнических характеристик получаемых покрытий для различных условий эксплуатации.

Методика исследований. Суспензионное нанесение ТСП. Сканирование поверхности образца с ТСП суспензионного нанесения на основе MoS₂ (далее ТСП_{СН}) ВНИИ НП 212 (MoS₂ + мочевино-формальдегидная смола) в исходном и приработанном состояниях осуществляли с помощью растрового микроскопа SuperProbe-733 японской фирмы JEOL во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении $E = 25$ кВ и силе тока $I = 3 \cdot 10^{-8}$ А.

Пары трения изготавливали из закаленной стали ШХ15. Микроанализ указанных поверхностей проводили с использованием анализа

тора LINK серии 860 (Великобритания–Япония) на основе бомбардировки поверхности электронами с последующим анализом рентгеновского спектра излучения. Профилометрирование выполняли на профилографе — профилометре модели 252 завода «Калибр». ТСП_{СН} наносили по методике ВНИИ НП с помощью механизированного приспособления.

Триботехнические испытания осуществляли на модернизированной установке с применением машины трения типа РП для комплексных испытаний на трение на испытательном стенде шайба — диск (по торцевой схеме трения) и на стенде для изучения трения и износа в вакууме (рис. 1, 2).

В ходе испытаний непрерывно измеряли коэффициент трения путем тензометрирования и поверхностную температуру с помощью термопары, укрепленной в специальном отверстии неподвижного образца, с последующим пересчетом измеренной температуры к поверхностной, оцениваемой с помощью термопары, закрепленной с наружной поверхности при имитации фрикционного нагрева после каждого опыта.

Комплексные исследования ресурса τ , коэффициента трения $f_{тр}$ и поверхностной температуры трения (далее температура трения) $T_{тр}$ пар трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в УВ выполняли с использованием математического планирования экспериментов по методу центрального композиционного ротатбельного униформ-планирования (ЦКРУП) второго порядка на стенде для изучения трения и износа в УВ (см. рис. 1, 2). В качестве влияющих факторов использовали контактную нагрузку N и скорость скольжения v . Диапазоны варьирования факторов приведены в табл. 1.

Приработку образцов проводили в разряженной атмосфере по достижении заранее заданной глубины вакуума ($p_v = 4$ мПа). В процессе испытаний осуществляли непрерывную запись значений параметров $f_{тр}$ и $T_{тр}$. После испытаний на контрольном образце измеряли дорожки трения, соответствующие каждому опыту, после чего определяли зависимости контактного давления газа p от контактной нагрузки N

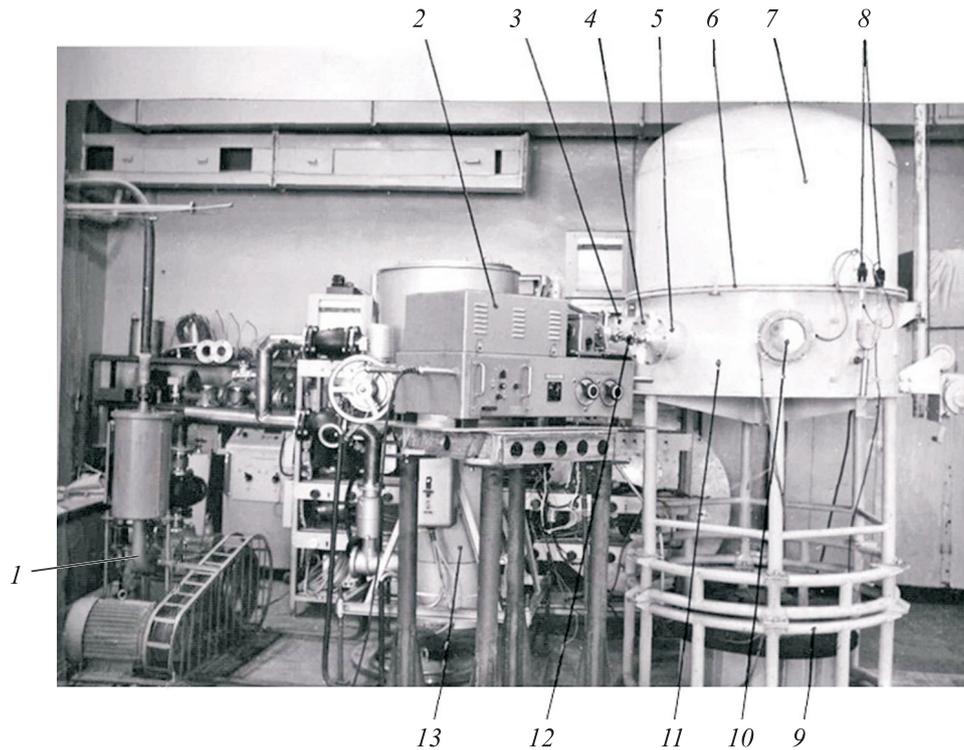


Рис. 1. Внешний вид стенда для изучения трения и износа пар трения с ТСП_{СН} в УВ:
 1 — форвакуумный механический насос ВН-7; 2 — привод типа ТХ 1-60 (тахометрическая установка); 3 — фланцы соединений с откачными насосами; 4 и 5 — вакуумный ввод вращения и фланец его крепления; 6 и 11 — вакуумная камера и ее днище; 7 — съемная крышка; 8 — измерительные вакуумные лампы; 9 — опорная рама; 10 — смотровое окно; 12 — карданные развязки; 13 — высоковакуумный агрегат ВА-8-Пр

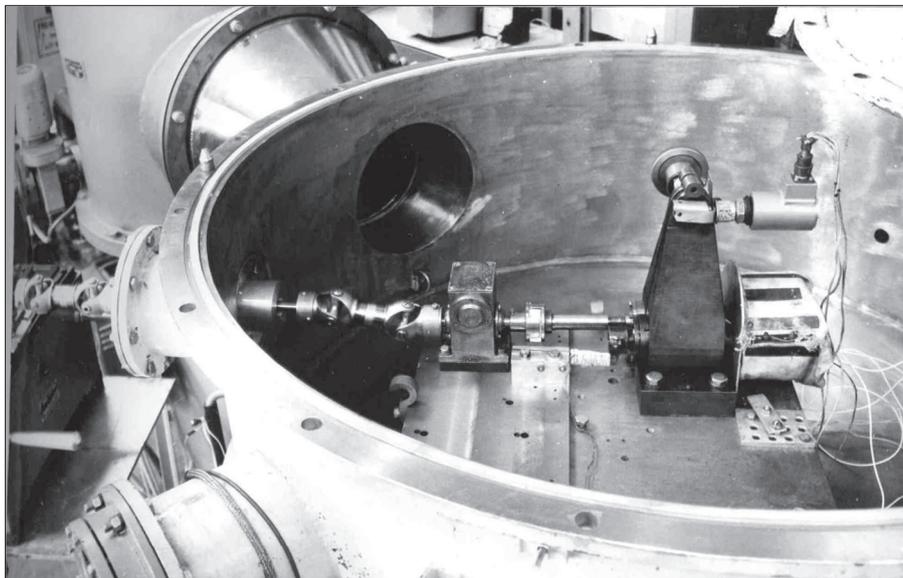


Рис. 2. Внешний вид нагрузочно-измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме

и скорости скольжения — $p = f(N, v)$ или зависимости $N = \varphi(p, v)$, которые использовали при пересчете контактной нагрузки N в контактное давление p .

Магнетронно-высокочастотное нанесение ТСП. Триботехнические испытания пары трения с ТСП проводили в УВ на установке Мису-оси [10, 11] (рис. 3, а), работающей по схеме

Таблица 1

Уровни и диапазоны варьирования факторов в эксперименте по методу ЦКРУП второго порядка при исследовании триботехнических характеристик пар трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в УВ

Фактор	Диапазон варьирования	Уровень			Звездные точки	
		основной	верхний	нижний	+ α	- α
v , м/с	0,148	0,295	0,443	0,147	0,504	0,087
N , Н	245,00	933,45	1178,45	688,45	1278,9	588,00

шар — диск ($p_b = 7 \cdot 10^{-7}$ Па), и установке Спалвинса [12] (рис. 3, б), функционирующей по схеме диск — шар ($p_b = 1,33 \cdot 10^{-7}$ Па).

Основные параметры триботехнических испытаний на установке Мисуоши: материал диска и шара — нержавеющая сталь 440 С; контактная нагрузка $N = 5,9$ Н, скорость скольжения $v = 0,2$ м/с. Характеристики исследуемых ТСП: материал основы — нержавеющая сталь 440 С; ТСП на основе MoS_2 магнетронного нанесения (далее ТСП_{МН}) толщиной $1,0 \pm 0,2$ мкм, ТСП_{СН} с полиамид-имидным связующим.

Основные параметры трибоиспытаний на установке Спалвинса: материал диска и шара радиусом $R = 4,75$ мм — нержавеющая сталь 440 С. Перед нанесением покрытия выполняли предварительную очистку образца, на который подавали отрицательный потенциал 2...5 кВ по отношению к электроду.

Для нанесения большинства пленок использованы следующие параметры высокочастотного нанесения покрытия: частота — 7 МГц; среда — аргон; потребляемая мощность — 400 Вт; отраженная мощность — около 2 Вт; выход постоянного тока — 500 В; целевое напряжение — 1,2...1,3 кВ; расстояние до образца — 2,54 см; скорость распыления — около 15 нм/мин. Температура образца, контролируемая термопарой во время нанесения ТСП, составляла около 90 °С.

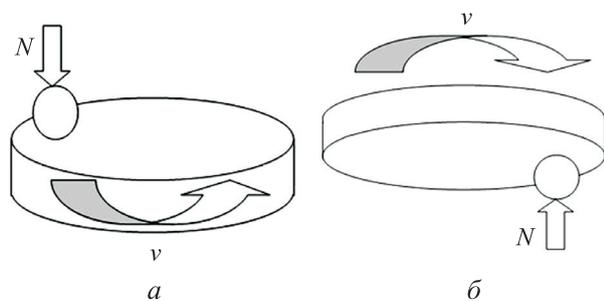


Рис. 3. Схемы трибовакуумных испытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума на установках Мисуоши (а) и Спалвинса (б)

ТСП, полученное химико-термической обработкой основы. Исследуемые ТСП созданы химико-термической обработкой молибденовой основы или нанесением молибденового слоя на рабочую поверхность металлических поверхностей (стальных, титановых и др.) с последующим сульфидированием, в результате которой образуются ТСП диффузионного типа (далее ТСП_д) на основе MoS_2 .

Трибоиспытания проводили в УВ ($p_b = 0,1 \dots 1,0$ мПа). Исследовали пару торцевого трения диск — кольцо, изготовленную из стали 07Х16Н6 с нанесенными на обе поверхности ТСП_д Димолит-4 (М-804) [13].

Оценку антифрикционных характеристик проводили для ТСП_д Димолит-1 (М-801) и Димолит-10 (М-810), полученных соответственно высокотемпературным сульфидированием молибденовой и ниобиевой основы и ТСП_{СН} ВНИИ НП 229 (MoS_2 + силикат натрия) в паре с молибденом [14].

Трибологические испытания проводили на установке ВВТ-1 по схеме вращающийся вал — втулка. Вал из исследуемого материала изготавливали диаметром 10 мм. Втулку для испытаний ТСП_д Димолит-1 выполняли из молибдена, для вала из М-810 — из ниобия. Для ТСП_д толщина составила 40...50 мкм, для ТСП_{СН} ВНИИ НП 229 — 10...12 мкм.

Условия испытаний: разряжение в рабочей камере $p_b = 2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ Па; скорость скольжения $v = 0,265$ м/с; температура образцов — 20...1000 °С. Нагрузка в опытах составляла 254,8 Н, что соответствовало контактному давлению $p = 1,57$ МПа. При большей нагрузке даже в опытах без нагрева покрытие разрушалось (наблюдалось резкое возрастание $f_{тр}$).

Результаты исследования. Суспензионное нанесение ТСП. Механизм трения описан в работах [15–17]. На основе исследования топографии поверхности трения ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 (растровой электронной микро-

скопии, профилометрирования, элементного микроанализа) определены функции отдельных компонентов композиционного ТСП_{СН}, нанесенного на металлическую подложку, при нагрузках, не превышающих предела текучести материала основы.

Выявлено, что ресурс работы ТСП_{СН} определяется долговечностью связующего, антифрикционные свойства — наполнителями (дисульфидом молибдена, графитом и пр.), а контактная нагрузка воспринимается микронеровностями основы.

В результате исследований [18] установлено, что оптимальная толщина ТСП_{СН} колеблется от $\delta_{\text{ВНИИ НП}} = 20 \pm 5$ мкм (согласно отечественным литературным источникам) до $\delta_{\text{NASA}} = 7,62 \dots 12,7$ мкм (согласно инструкции NASA). Экспериментальная зависимость ресурса пары трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 от толщины покрытия, полученная на машине трения типа МИ (по роликовой схеме трения) [15], приведенная на рис. 4, подтверждает сделанный ранее вывод.

При трении исходная толщина ТСП_{СН} (~20 мкм) уменьшается настолько (до 2...3 мкм), что наиболее высокие микронеровности контактируют через смазочную пленку MoS₂. Оптимальная шероховатость обработки основы перед суспензионным нанесением покрытия $Ra = 0,3 \dots 0,6$ мкм.

В процессе приработки хаотично расположенные в связующем частицы MoS₂ ориентируются вдоль поверхности трения, обеспечивая резкое снижение коэффициента трения. Динамика изнашивания ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 показана на рис. 5, где на этапе приработки толщина этого покрытия $\delta_{\text{прВНИИ НП}} = 17,5$ мкм

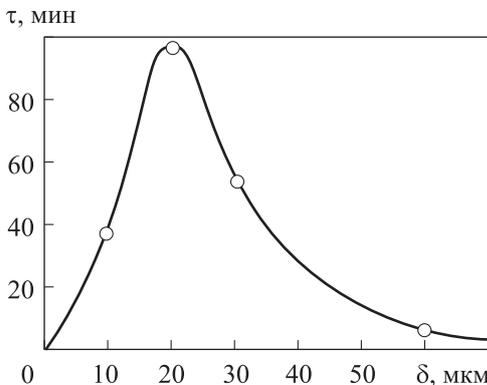


Рис. 4. Экспериментальная зависимость ресурса τ пары трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 от его толщины δ, полученная на машине трения типа МИ

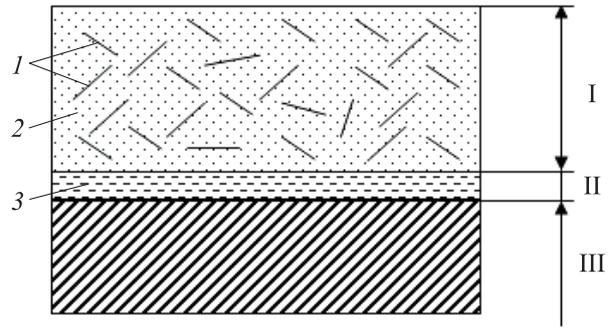


Рис. 5. Динамика изнашивания ТСП_{СН} ВНИИ НП 212:

I — этап приработки (1 — частицы MoS₂; 2 — связующее);
 II — установившийся режим трения (3 — приработанный слой ориентированных частиц MoS₂);
 III — металлическая основа

и $\delta_{\text{пр NASA}} = 10,2$ мкм, в установившемся режиме трения ($\delta_{\text{уст}} = 2 \dots 3$ мкм).

Согласно полученным данным, независимо от исходной толщины ТСП_{СН} основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на этап приработки и лишь 20...25 % — на установившийся режим трения. Таким образом, именно смазочная пленка толщиной 2...3 мкм обеспечивает функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия. Рентгеноструктурный анализ показал, что толщина ТСП_{СН} в начальный период составляет 2...5 мкм, а в период задира — 0,4...0,6 мкм.

Оценка трибологических характеристик для НАУ и УВ. По результатам экспериментальных исследований установлено, что ресурс узлов трения с ТСП_{СН} со связующим главным образом зависит от температурного состояния поверхностей трения [17]. Для расчета ресурса рассматриваемых пар трения с ТСП_{СН} разработан алгоритм, включающий в себя следующие шаги:

- оценку температуры трения $T_{\text{тр}}$ с использованием универсальных корреляционных зависимостей $T_{\text{тр}}$ от нагрузочно-скоростных параметров работы узла (контактного давления p и скорости скольжения v);

- расчет ресурса τ пар с ТСП_{СН} с использованием термокорреляционных зависимостей $\tau = f(T_{\text{тр}})$ для НАУ и УВ.

На первом этапе расчетов использованы зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов в НАУ (табл. 2), приведенные в работе [17].

На втором этапе расчетов в качестве исходных зависимостей использованы результаты

Таблица 2

Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов в НАУ

Тип ТСП на основе MoS ₂	Схема трения	Диапазон варьирования		Зависимость $T_{тр} = f(p, v)$, °C
		N, H (p, МПа)	v, м/с	
ВНИИ НП 212	Роликовая (модернизированная машина трения РП)	236...1337 (23,1...133,7)	0,096...1,224	$T_{тр} = 36,49 + 132,23v + 0,535p + 0,234pv - 47,94v^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot p^2$
	Роликовая (машина трения СМТ)	210...1790 (12,2...103,5)	1,472...3,728	$T_{тр} = 119,35 + 10,26v + 0,065p + 0,335pv$
Molykote 7409	Торцевая (стенд шайба — диск)	755...9045 (5,6...67,2)	0,11...0,25	$T_{тр} = 67,27 - 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,011p^2$

исследований пар с ТСП_{СН}, приведенные в работе [15] и полученные автором экспериментально.

При определении термокорреляционной зависимости $\tau = f(T_{тр})$ в НАУ использованы данные для пар трения с ТСП_{СН} на основе MoS₂ с мочевино-формальдегидной смолой К4-11-02. В результате интерполяции экспериментальных данных с помощью программы MATLAB получена следующая зависимость [19]:

$$\tau = -3,528 \cdot 10^6 T_{тр}^4 + 0,00334 T_{тр}^3 - 1,085 T_{тр}^2 + 131,4 T_{тр} - 3243.$$

Для сравнительной оценки ресурса рассматриваемых пар трения с ТСП применительно к различным условиям эксплуатации на рис. 6 [20] приведена графическая интерпретация термокорреляционной зависимости $\tau = f(T_{тр})$ для пар трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в УВ.

Для диапазона температуры трения $T_{тр} = 12...144$ °C указанная зависимость описывается выражением

$$\tau = 0,3504 T_{тр}^2 - 117,81 T_{тр} + 10046.$$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, показал следующее:

- в УВ при снижении температуры трения ресурс пар с ТСП_{СН} постоянно растет; при $T_{тр} > 100$ °C он оказывается ниже, чем в НАУ;
- в НАУ при $T_{тр} < 100$ °C механизм трения пар с ТСП_{СН} носит абразивный характер, так как температурный режим трения недостаточен для образования смазочной пленки MoS₂, ориентированной вдоль поверхности трения, что проявляется в повышенном значении коэффициента трения $f_{тр}$.

Для оценки антифрикционных характеристик пар трения с ТСП_{СН} можно использовать

корреляционные зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ от температуры $T_{тр}$, приведенные в работе [21].

Корреляционная зависимость $f_{тр} = f(T_{тр})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 применительно к НАУ получена путем обработки результатов экспериментальных исследований при повышенной температуре и в НАУ на модернизированной установке для комплексных испытаний на трение при повышенной температуре трения для диапазона $T_{тр} = 74...336$ °C:

$$f_{трНАУ} = 0,01197 + 8,881/T_{тр}.$$

Для УВ аналогичная зависимость в диапазоне температуры трения $T_{тр} = 12...144$ °C [20] адекватно описывается выражением

$$f_{трУВ} = 0,381 T_{тр}^{-0,41}.$$

$\tau \cdot 10^{-3}$, мин

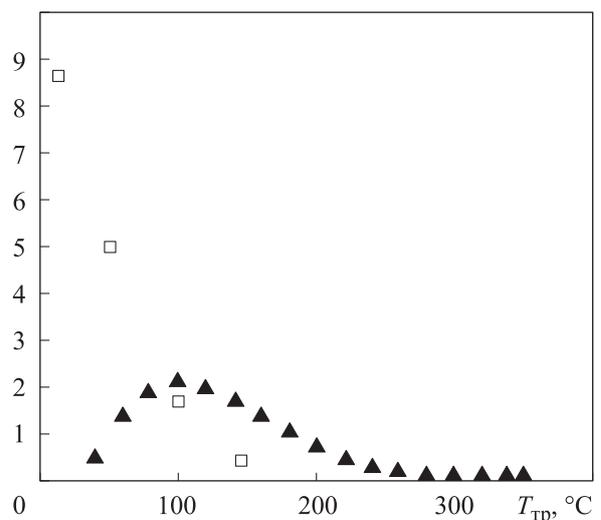


Рис. 6. Термокорреляционные зависимости ресурса τ пары трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 от температуры трения $T_{тр}$ в НАУ (▲) и УВ (□)

Таблица 3

Антифрикционные характеристики пар трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в НАУ и УВ

$T_{тр}, °C$	$f_{трНАУ}$	$f_{трУВ}$	$f_{трНАУ}/f_{трУВ}$
12	0,7520*	0,1380	5,47
45	0,2090*	0,0800	2,62
78	0,1260*	0,0639	1,97
111	0,0920	0,0553	1,66
144	0,0736	0,0497	1,48

* Данные получены интерполяцией по расчетной зависимости.

Антифрикционные характеристики пар трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 для НАУ и УВ в диапазоне температуры трения $T_{тр} = 12...144 °C$ приведены в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 показывает, что для рассмотренного диапазона температуры трения $T_{тр}$ коэффициенты трения пары с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 для НАУ в 1,5–5 раз выше, чем для УВ.

Магнетронно-высокочастотное нанесение ТСП. Механизм изнашивания. Согласно данным работы [10], толщина ТСП_{МН} и ТСП на основе MoS₂ высокочастотного нанесения (далее ТСП_{ВН}), обеспечивающая высокую износостойкость, составила $1 ± 0,2$ мкм при шероховатости поверхности покрытия $Ra = 0,032$ мкм (причем для ТСП толщиной $δ = 0,2$ мкм ресурс покрытия существенно снижался). Шероховатость полированной подложки $Ra = 0,009$ мкм.

Оптимальная шероховатость основы перед нанесением ТСП_{МН} [6] $Ra = 0,2$ мкм для металлической основы (подшипниковой стали 52100). С увеличением шероховатости Ra поверхности основы перед магнетронным нанесе-

нием ТСП с 0,05 до 0,40 мкм коэффициент трения $f_{тр}$ снижается от 0,05 до 0,02.

В работе Т. Спалвинса [22] приведена динамика износа ТСП_{МН} и ТСП_{ВН} (рис. 7). Описанный механизм трения магнетронно-высокочастотно напыленной пленки MoS₂ в целом схож с механизмом трения приработанной суспензионной дисульфидмолибденовой пленки.

Во время приработки ТСП толщиной $δ = 1$ мкм происходит разрушение его верхнего слоя (около 80 %) и формирование смазочной пленки толщиной $δ_{эф} = 0,2$ мкм, обеспечивающей практически весь ресурс покрытия.

Результаты сравнительных трибоиспытаний в УВ. Анализ результатов проведенных исследований показал, что у пары трения ТСП_{МН} ресурс в 2,51 раз меньше, чем у пары трения с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212, и в 3,65 раз ниже, чем у аналогов зарубежного производства.

В результате дальнейших исследований выявлены термодетерминационные зависимости ресурса пары трения с ТСП на основе MoS₂, нанесенными разными методами в УВ, от температуры трения $T_{тр}$, приведенные на рис. 8. Здесь показаны результаты эксперимента для ТСП_{МН} и ТСП_{ВН} [18, 21], для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 и ТСП_{СН} с полиамид-имидным связующим [10].

Зависимость ресурса пар трения с ТСП_{ВН} от температуры трения $T_{тр}$ подчиняется экспоненциальному закону. Для диапазона температуры трения $T_{тр} = 55...112 °C$ она удовлетворительно описывается выражением

$$\tau = 39851e^{-0,039T_{тр}}$$

Коэффициент детерминации этой зависимости $R^2 = 0,9993$.

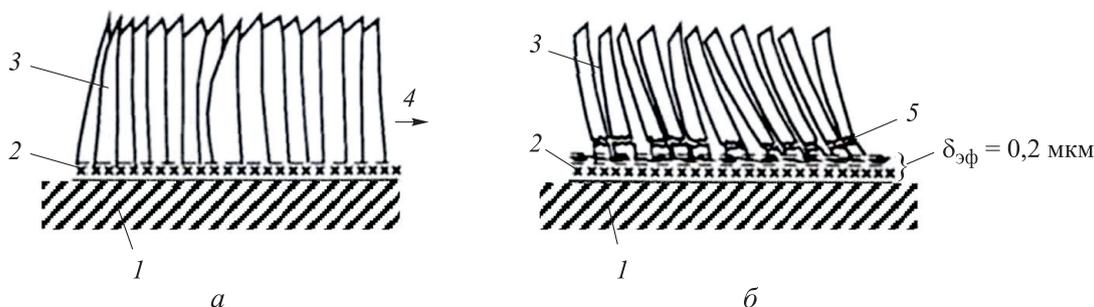


Рис. 7. Структура смазочной пленки ТСП_{МН}:

a — морфологический рост напыленных пленок MoS₂; *б* — перелом напыленной пленки MoS₂ при скольжении;
 1 — подложка; 2 — формирование гребня; 3 — зона столбчатых структур; 4 — скольжение;
 5 — перелом; $δ_{эф}$ — эффективная толщина ТСП

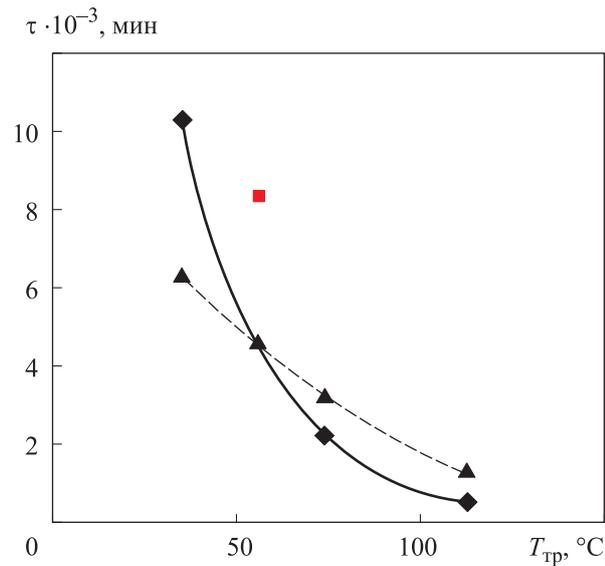


Рис. 8. Термокорееляционные зависимости ресурса τ пары трения с ТСП на основе MoS_2 , нанесенными разными методами в УВ, от температуры трения $T_{\text{тр}}$:
 ◆ — результаты эксперимента для ТСП_{МН} и ТСП_{ВН};
 ▲ и ■ — результаты эксперимента для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 и ТСП_{СН} с полиамид-имидным связующим;
 — — экспоненциальная зависимость $f_{\text{тр}} = f(T_{\text{тр}})$ для ТСП_{МН} и ТСП_{ВН}; - - - зависимость $f_{\text{тр}} = f(T_{\text{тр}})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212

Анализ зависимостей $\tau = f(T_{\text{тр}})$, приведенных на рис. 8, показывает, что ресурс ТСП_{ВН} в рассмотренных диапазонах температуры трения $T_{\text{тр}}$ незначительно отличается от ресурса τ ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 и ТСП_{СН} с полиамид-имидным связующим в УВ. С повышением $T_{\text{тр}}$ ресурс указанных пар с ТСП снижается по зависимости, близкой к экспоненциальному закону.

В результате проведенных исследований показано, что у рассматриваемых видов ТСП в УВ коэффициент трения изменяется в пределах

0,02...0,07, а его среднее значение в установившемся режиме составляет 0,0418.

ТСП, полученное химико-термической обработкой основы. Механизм изнашивания. В литературе описаны ТСП, полученные химико-термической обработкой молибденовой основы или нанесением молибденового слоя на рабочую поверхность металлических поверхностей (стальных, титановых и др.) с последующим сульфидированием, в результате которой образуются ТСП_Д на основе MoS_2 [23, 24] (табл. 4).

Динамика изнашивания пар трения с ТСП_Д приведена в работе [13], где в УВ ($p = 0,1...1,0$ МПа) исследована пара торцевого трения диск — кольцо, изготовленная из стали 07Х16Н6 с нанесенными на обе поверхности ТСП_Д Димолит-4.

Анализ приведенных в работе [13] графиков показал, что весь период трения подвижных образцов можно разделить на три этапа: подготовку продолжительностью $\tau_{\text{пр}} = 2$ ч, установившийся режим $\tau_{\text{уст.тр}} = 60$ ч и катастрофический износ $\tau_{\text{кат.изн}} = 2$ ч.

Основные расчетно-экспериментальные трибологические параметры пары трения с ТСП_Д Димолит-4 в УВ ($p_{\text{в}} = 0,1...1,0$ МПа) приведены в табл. 5, где индекс «п» соответствует подвижному образцу, индекс «н» — неподвижному, индекс «ср» — среднему значению параметра.

Исходя из предположения, что динамики изнашивания диффузионных покрытий типа Димолит подобны, схему изнашивания ТСП_Д можно представить в виде, приведенном на рис. 9.

Таблица 4

Основные характеристики ТСП химико-термического типа

ТСП	Состав	Толщина, мкм	Микротвердость, HV_h	Примечание
Димолит-1 (М-801)	Жаропрочная молибденовая основа (подложка — Mo) + MoS_2	5...120	600...900	Диапазон рабочих температур $\Delta T = -196...850$ °С; температура синтеза $T_c = 550...700$ °С. ТСП хорошо проявило себя в условиях возвратно-вращательного движения
Димолит-2 (М-802)	$\text{MoS}_2 + \text{Pb}$ (подложка — Mo)	10...80	900...1000	$\Delta T =$ до 900 (1000) °С, $T_c = 650...750$ °С. ТСП обеспечивает более высокие несущую способность и износостойкость, чем Димолит-1

Окончание табл. 4

ТСП	Состав	Толщина, мкм	Микротвердость, HV _h	Примечание
Димолит-3 (М-803)	Твердый раствор ZnS в MoS ₂ (подложка — Mo)	10...80	3500...5000	ΔT = до 350 (450) °C, T _c = 900 °C. ТСП имеет более высокие твердость и износостойкость, но повышенную хрупкость. ТСП получают на стальных и титановых деталях предварительным нанесением молибденового слоя + сульфидированием
Димолит-4 (М-804)	MoS ₂ с сульфидами Fe, Cr, Ni (основа — высокохромная сталь)	10...250	1000...2500	ΔT варьируется от криогенных температур до 400...600 °C, T _c = 500 и 600 °C. На высокохромистых сталях (например, 20X13). Основа — MoS ₂ , легированный сульфидами основных элементов стальной основы (Fe, Cr, Ni). Это ТСП получило наибольшее распространение
Димолит-10 (М-810)	MoS ₂ + PbS (на ниобии)	—	—	Спеченный материал, имеющий самую высокую несущую способность. Эффективны в высокоскоростных подшипниках скольжения
Димолит-12 (М-812)	MoS ₂ + PbS и FeMo	—	—	То же

Таблица 5

Расчетно-экспериментальные трибологические параметры пары трения с ТСП_д Димолит-4 в УВ (p_в = 0,1...1,0 МПа)

Этап наработки	Наработка при трении, ч			Линейная интенсивность изнашивания			Путь трения, км			Износ, мкм		
	τ _п	τ _н	τ _{ср}	I _{нп} ·10 ⁹	I _{нн} ·10 ⁹	I _{нср} ·10 ⁹	L _п	L _н	L _{ср}	δ _н	δ _п	δ _{ср}
Приработка	2	2	2,0	2,3	2,5	2,40	1,4	1,4	1,40	3,20	3,5	3,35
Установившийся режим	60	61	60,5	0,6	1,0	0,80	41,8	42,5	42,17	25,10	42,5	33,80
Катастрофический износ	2	2	2,0	0,8	1,5	1,15	1,4	1,4	1,40	1,12	2,1	1,61

Анализ ТСП_д (см. рис. 9) позволяет предположить следующее:

- этап приработки при износе δ_{пр} = 3,35 мкм вызван необходимостью выравнивания микронеровностей и отклонений формы контактирующих поверхностей;

- на этапе установившегося трения, когда интенсивность изнашивания в 10 раз ниже, чем на этапе приработки (0,8 · 10⁻⁹) и в целом соответствует интенсивности изнашивания ТСП_{сн} (0,9 · 10⁻⁹), наступает режим оптимального износа для данной структуры трения;

- однако в отличие от ТСП_{сн}, где трение реализуется в тонком поверхностном слое (2...3 мкм) на металлической шероховатой основе, в ТСП_д, вероятно, вследствие более низкой прочности смазочной структуры в установившемся режиме изнашиваются слои толщиной 33,8 мкм; при этом значения антифрикционных характеристик остаются на уровне приработанных пленок ТСП.

Оценка триботехнических характеристик для условий вакуума. Для оценки интенсивности

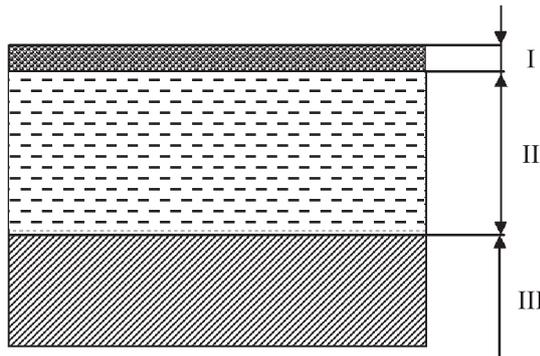


Рис. 9. Динамика износа ТСПД в УВ: 1 — износ на этапе приработки $\delta_{пр} = 3,35$ мкм; 2 — износ в установившемся режиме трения $\delta_{уст} = 33,8$ мкм; 3 — металлическая основа (сульфидированное молибденовое покрытие стальной основы Димолит-4 или сульфидированная молибденовая основа для Димолит-1)

линейного изнашивания рассматриваемых ТСПД использованы результаты исследования работы [13], где приведены зависимости интенсивности изнашивания I_h от контактного давления p (рис. 10).

С использованием данных автора для пар с ТСПСН ВНИИ НП 212 на указанном графике также показана аналогичная зависимость, полученная пересчетом диапазонов изменения параметров температуры трения $T_{тр}$:

$$\tau = 10804,7 - 34849v - 66,75p + 22791,34v^2 + 166,03vp, \quad (1)$$

где $p = 61 \dots 121$ МПа; $v = 0,087 \dots 0,500$ м/с.

Зависимость (1) получена для УВ ($p_v = 4$ МПа) и температуры трения $T_{тр}$ в диапазоне $83 \dots 144$ °С, рассчитываемой по выражению

$$T_{тр} = 3,31 + 291,64v + 0,643p - 282,19v^2.$$

Скорость скольжения для условий эксперимента Б.П. Нажесткина $v = 0,2$ м/с попала в диапазон изменения этого параметра для ТСПСН ВНИИ НП 212. Диапазон контактного давления $p = 1 \dots 8$ МПа вышел за пределы, исследованные при получении зависимости (1).

Анализ приведенных на рис. 10 зависимостей показывает следующее:

- при увеличении контактного давления с 1 до 8 МПа интенсивность линейного изнашивания ТСПД в УВ повышается в 2 раза;
- интенсивность линейного изнашивания пар трения с ТСПД Димолит-4 в среднем в 4,5 раза выше, чем у пар с ТСПСН ВНИИ НП 212.

В результате аппроксимации экспериментальных данных для рассматриваемых ТСПД

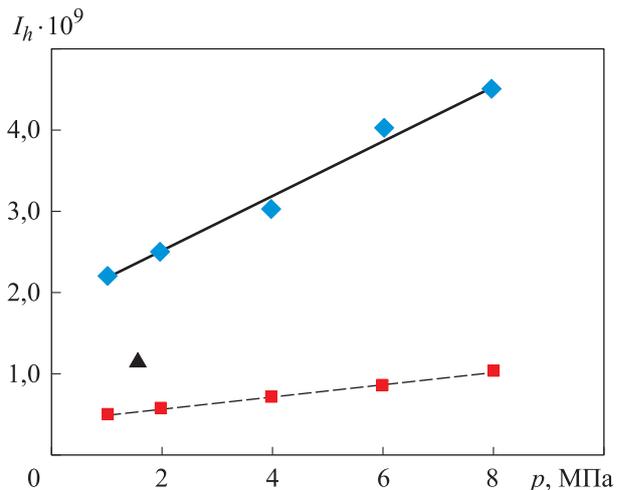


Рис. 10. Зависимости интенсивности изнашивания I_h от контактного давления p пар трения с ТСП в УВ ($p_v = 0,1 \dots 1,0$ МПа) при температуре нагрева $T_n = 298$ К и скорости скольжения $v = 0,2$ м/с: \blacklozenge и — — результаты эксперимента Б.П. Нажесткина для ТСПД Димолит-4 и их аппроксимация по выражению (2); \blacksquare и - - — результаты эксперимента для ТСПСН ВНИИ НП 212 и их аппроксимация по выражению (3)

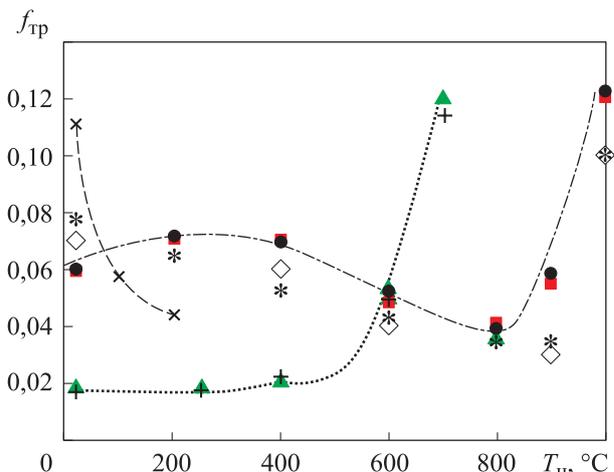


Рис. 11. Зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ в установившемся режиме трения от температуры нагрева T_n в УВ для дисульфидмолибденовых покрытий разного типа: $\diamond, \blacksquare, \blacktriangle, \times$ — результаты эксперимента для ТСПД Димолит-1 и Димолит-10, ТСПСН ВНИИ НП 229 и ВНИИ НП 212 соответственно; $*$, \bullet и $+$ — данные расчета для ТСПД Димолит-1, Димолит-10 и СПСН ВНИИ НП 229 соответственно; - - - — степенная зависимость $f_{тр} = f(T_n)$ для ТСПСН ВНИИ НП 212; и - - - — зависимость $f_{тр} = f(T_n)$ для ТСПСН ВНИИ НП 229 и ТСПД Димолит 10

в УВ, приведенных на рис. 10, получены следующие выражения:

- для ТСПД Димолит-4 ($R^2 = 0,9858$)

$$I_h = 3 \cdot 10^{-10} p + 2 \cdot 10^{-9}; \quad (2)$$

- для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 ($R^2 = 0,999$)

$$I_h = 7 \cdot 10^{-11} p + 4 \cdot 10^{-10}. \quad (3)$$

Результаты оценки антифрикционных характеристик ТСП_д Димолит-1 и Димолит-10 приведены в работе [14]. После обработки экспериментальных зависимостей коэффициента трения от температуры нагрева T_n в УВ для пар трения с ТСП_д и ТСП_{СН} получены зависимости, приведенные на рис. 11. Там же показаны расчетные зависимости для ТСП_д Димолит-1, Димолит-10 и ТСП_{СН} ВНИИ НП 229, а также степенная зависимость, построенная с использованием зависимости $f_{тр} = f(T_{тр})$ после наработки в условиях космоса [20] для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212.

Как видно из рис. 11, антифрикционные характеристики ТСП_д в установившемся режиме трения при температуре нагрева до 600 °С несколько выше, чем для ТСП_{СН} со связующими. С ростом температуры нагрева до предельного значения (800 °С) коэффициенты трения ТСП_д Димолит-1 и Димолит-10 снижаются до 0,03...0,04.

Выводы

1. Анализ результатов исследования ТСП_{СН} позволил выявить следующее:

- по отечественным данным, оптимальная толщина покрытия составляет 20 ± 5 мкм, по зарубежным — 7,62...12,7 мкм;
- независимо от исходной толщины ТСП_{СН} основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и лишь 20...25 % — на установившийся режим трения;
- в НАУ механизм трения пар с ТСП_{СН} при $T_{тр} < 100$ °С носит абразивный характер, так как температурный режим трения недостаточен для образования смазочной пленки MoS₂, ориентированной вдоль поверхности трения; при $T_{тр} > 100$ °С образуется эффективная смазочная пленка толщиной 2...3 мкм, которая обеспечивает практически весь ресурс фрикционного сопряжения;
- ресурс и антифрикционные характеристики рассмотренных пар трения с ТСП главным

образом зависят от температурного состояния поверхностей трения; как для НАУ, так и для УВ указанные показатели с повышением температуры трения снижаются;

2. Результаты исследования ТСП магнетронно-высокочастотного нанесения позволяют заключить:

- при приработке ТСП толщиной $\delta = 1$ мкм происходит разрушение верхнего слоя (около 80 %) и формирование смазочной пленки толщиной $\delta_{пр} = 0,2$ мкм, обеспечивающей практически весь ресурс покрытия;
- ресурс ТСП_{МН} и ТСП_{ВН} оказался в 2,51 раза меньше, чем у ТСП_{СН} ВНИИ НП 212, и в 3,65 раза ниже, чем у аналогов зарубежного производства;
- в УВ ресурс ТСП_{ВН} в рассмотренном диапазоне температуры трения $T_{тр}$ незначительно отличается от такого для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 и ТСП с полиамид-имидным связующим для УВ; с повышением температуры трения $T_{тр}$ ресурс указанных пар трения с ТСП снижается по зависимости, близкой к экспоненциальному закону;
- в УВ коэффициент трения ТСП_{МН} увеличивается с 0,02 до 0,07.

3. По результатам исследования ТСП_д установлено:

- в отличие от ТСП_{СН}, где трение реализуется в тонком поверхностном слое (2...3 мкм), в ТСП_д, вероятно, вследствие более низкой прочности смазочной структуры в установившемся режиме трения изнашиваются слои толщиной 34 мкм;
- в УВ при скорости скольжения $v = 0,2$ м/с и увеличении контактного давления с 1 до 8 МПа интенсивность линейного изнашивания ТСП_д повышается в 2 раза;
- в УВ интенсивность линейного изнашивания пар с ТСП_д Димолит-4 в среднем в 4,5 раза выше, чем у пар с ТСП_{СН} ВНИИ НП 212;
- антифрикционные характеристики ТСП_д в установившемся режиме трения до температуры нагрева 600 °С несколько превышают таковые для ТСП_{СН} со связующим; с повышением температуры нагрева до предельного значения (800 °С) коэффициенты трения ТСП_д Димолит-1 и Димолит-10 снижаются до 0,03...0,04.

Литература

- [1] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, Экопресс, 2010. 604 с.
- [2] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2007. 54 с.

- [3] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-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)
- [4] Мышкин Н.К., Басинюк В.Л., Ковальчук Г.Ф. и др. Космическая трибология: состояние и перспективы. *Механика машин и механизмов и материалов*, 2012, № 3–4, с. 126–130.
- [5] Сентюрихина Л.Н., Малышев Б.И., Опарина Е.М. и др. Твердая высоковакуумная высокотемпературная смазка. *Химия и технология топлив и масел*, 1961, № 7, с. 13–15.
- [6] Robertst E.W., Williamst B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS₂ films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1992, vol. 25, no. 1A, art. A65, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/1A/012>
- [7] 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.
- [8] Лобова Т.А., Марченко Е.А. Использование нового класса самосмазывающихся материалов для обеспечения надежности функционирования узлов трения космических аппаратов. *Трение и износ*, 2005, т. 26, № 3, с. 290–293.
- [9] Хопин П.Н. Термокореляционная оценка трибологических характеристик твердосмазочных селенидных покрытий различных методов нанесения для условий нормальной атмосферы. *Трибология — машиностроению. Тр. XIII Межд. науч.-тех. конф. М., ИМАШ РАН*, 2020, с. 337–341.
- [10] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. CRC Press, 2001. 416 p.
- [11] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. NASA/TM-1999-209088/PART1. NASA, 1999. 30 p.
- [12] Spalvins T. *Lubrication with sputtered MoS₂ films*. NASA TM X-67832. Lewis Research Center, 1971. 16 p.
- [13] Нажесткин Б.П., Ковалев Е.П., Воробьев А.Н. К расчету интенсивности изнашивания твердосмазочных покрытий на основе синтетического дисульфида молибдена при работе в вакууме. *Трение и износ*, 1986, т. 7, № 4, с. 747–750.
- [14] Хопин П.Н. Оценка триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий, полученных химико-термической обработкой основы. В: *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. Тверь, ТвГТУ, 2021, с. 56–61.
- [15] Сентюрихина Л.Н., Опарин Е.М. *Твердые дисульфидмолибденовые смазки*. Москва, Химия, 1966. 152 с.
- [16] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press, 1964.
- [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., Гриб В.В. Микроанализ поверхностей трения твердосмазочных покрытий различных видов нанесения. *Вестник ТвГТУ*, 2021, № 1, с. 5–17, doi: <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-1-5-17>
- [19] Хопин П.Н., Козлова О.В., Горбач Л.Е. Оценка долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями при реверсивном движении. *Трение и износ*, 2018, т. 39, № 6, с. 649–656.
- [20] 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.
- [21] Хопин П.Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования. *Трение и износ*, 2015, т. 36, № 5, с. 491–498.
- [22] Spalvins T. Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control. NASA technical memorandum 103652. NASA, 1991. 15 p.
- [23] Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. *Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме*. Москва, Машиностроение, 1991. 188 с.
- [24] Хопин П.Н., Шишкин С.В. *Трибология*. Москва, Юрайт, 2021. 236 с.

References

- [1] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wearing and lubricant)]. Moscow, Ekopress Publ., 2010. 604 p. (In Russ.).
- [2] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruktivnyye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Construction materials and lubricants for spacecraft]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2007. 54 p. (In Russ.).
- [3] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-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)
- [4] Myshkin N.K., Basinyuk V.L., Koval'chuk G.F. et al. Space tribology: the states and prospects. *Mekhanika mashin i mekhanizmov i materialov* [Topical Issues of Mechanical Engineering], 2012, no. 3–4, pp. 126–130. (In Russ.).
- [5] Sentyurikhina L.N., Malyshev B.I., Oparina E.M. et al. Solid high-vacuum high-temperature lubricant. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1961, no. 7, pp. 13–15. (In Russ.).
- [6] Robertst E.W., Williamst B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS₂ films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1992, vol. 25, no. 1A, art. A65, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/1A/012>
- [7] Yarosh V.M., Moishev 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.).
- [8] Lobova T.A., Marchenko E.A. Use of new class of self-lubricating materials to provide reliability of friction units of space vehicles. *Trenie i iznos*, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 290–293. (In Russ.).
- [9] Khopin P.N. [Termocorrelation evaluation of tribological characteristics of the solid lubricant selenium coatings of various application methods for conditions normal atmosphere]. *Tribologiya — mashinostroeniye. Tr. XIII Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [From Tribology to Machine Building. Proc. XIII Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, IMASH RAN Publ., 2020, pp. 337–341. (In Russ.).
- [10] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. CRC Press, 2001. 416 p.
- [11] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. NASA/TM-1999-209088/PART1. NASA, 1999. 30 p.
- [12] Spalvins T. *Lubrication with sputtered MoS₂ films*. NASA TM X-67832. Lewis Research Center, 1971. 16 p.
- [13] Nazhestkin B.P., Kovalev E.P., Vorob'yev A.N. On calculation of wearing intensity of a solid lubricant coating based on synthetic molybdenum disulfide in vacuum. *Trenie i iznos*, 1986, vol. 7, no. 4, pp. 747–750. (In Russ.).
- [14] Khopin P.N. Evaluation of tribotechnical characteristics of solid lubricating coverings obtained by chemical-thermal treatment of the substrate. In: *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya* [Mechanics and physics of processes on the surface and contact area of solids, and parts for technological and power equipment]. Tver', TvGTU Publ., 2021, pp. 56–61. (In Russ.).
- [15] Sentyurikhina L.N., Oparin E.M. *Tverdye disulfidmolibdenovye smazki* [Solid molybdenum lubricants]. Moscow, Khimiya Publ., 1966. 152 p. (In Russ.).
- [16] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press, 1964.
- [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.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 14–21, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366612010060>)
- [18] Khopin P.N., Grib V.V. Microanalysis of the friction surfaces of solid lubricating coatings of various types of application. *Vestnik TvGTU*, 2021, no. 1, pp. 5–17, doi: <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-1-5-17> (in Russ.).
- [19] Khopin P.N., Kozlova O.V., Gorbach L.E. Durability evaluation for friction pairs with solid lubrication coatings under reverse motion. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 649–656. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 505–511, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618060053>)

- [20] 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>)
- [21] Khopin P.N. Assessment of antifriction characteristics of friction pairs with solid-lubricating coatings under various operating conditions. *Trenie i iznos*, 2015, vol. 36, no. 5, pp. 491–498. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2015, vol. 36, no. 5, pp. 374–379, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366615050074>)
- [22] Spalvins T. *Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control*. NASA technical memorandum 103652. NASA, 1991. 15 p.
- [23] Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. *Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume* [Materials for dry friction units working in vacuum]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 188 p. (In Russ.).
- [24] Khopin P.N., Shishkin S.V. *Tribologiya* [Tribology]. Moscow, Yurayt Publ., 2021. 236 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.12.2021

Информация об авторе

ХОПИН Петр Николаевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов». МАИ (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.), Professor, Department of Manufacturing Technology and Operation of Aircraft Engines. Moscow Aviation Institute (125993, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, Volokolamskoe h.way, Bldg. 4; e-mail: chopinp@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н. Исследование механизмов трения и оценка трибологических характеристик твердосмазочных покрытий, нанесенных разными методами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 4, с. 73–86, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-73-86

Please cite this article in English as:

Khopin P.N. On the Friction Mechanisms and Assessment of Tribological Characteristics of Solid Lubricant Coatings of Various Application Methods. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 4, pp. 73–86, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-73-86