

УДК 621.891:519.28

Сравнительная оценка триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий различных методов нанесения и условий трения применительно к испытаниям в нормальной атмосфере и вакууме

П.Н. Хопин, С.Ю. Мишаков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Comparative assessment of tribotechnical characteristics of hard-lubricating coatings of various application methods and friction conditions in relation to tests in a normal atmosphere and in a vacuum

P.N. Khopin, S.Yu. Mishakov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Выполнено сравнение значений относительного износа и антифрикционных характеристик пар трения с твердосмазочным покрытием (ТСП) магнетронного и суспензионного нанесения на основе MoS_2 и комбинированного состава $\text{MoS}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Au}$, работающих по схемам чистого скольжения и реверсивного движения в условиях нормальной атмосферы, сухого азота и вакуума. Установлено, что в условиях нормальной атмосферы при поверхностной температуре трения менее 150°C наименьший относительный износ имеет ТСП ВНИИ НП 212 суспензионного нанесения при трении скольжения. При температуре трения $150\text{--}200^\circ\text{C}$ относительный износ рассмотренных покрытий одинаковый и составляет $(1,8\text{--}8,0) \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$. Если температура равна или больше 200°C , то относительный износ ТСП при трении скольжения значительно возрастает. По результатам экспериментов Т.В. Шарфа в условиях вакуума и сухого азота выявлено, что относительный износ ТСП комбинированного состава $\text{MoS}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Au}$ магнетронного нанесения при реверсивном движении в 4,7 раза меньше, чем у ТСП на основе MoS_2 . Обнаружено, что для близких по типу и условиям трения ТСП на основе MoS_2 магнетронного нанесения при температуре $51\text{--}55^\circ\text{C}$ и толщине покрытий 1 мкм относительный износ при трении скольжения в экспериментах К. Мисуоки в 7,8 раза меньше, а коэффициент трения в 11,7 раз больше, чем при реверсивном трении в опытах Шарфа.

EDN: FWDWJY, <https://elibrary/fwdwjy>

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, триботехнические характеристики, условия нормальной атмосферы, различные методы нанесения

A comparative assessment of the relative wear and antifriction characteristics of friction pairs with magnetron and suspension solid lubricating coatings (SLC) based on MoS_2 and the combined composition $\text{MoS}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Au}$, operating according to the schemes of clean sliding and reverse motion in conditions of a normal atmosphere, dry nitrogen and

vacuum, was carried out. For conditions of a normal atmosphere up to a surface friction temperature of less than 150 °C, the lowest relative wear is detected by SLC VNII NP 212 suspension application during sliding friction. At a contact temperature of 150–200 °C, the relative wear of the coatings under consideration is the same and amounts to and $(1,8-8,0) \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. With an increase in the contact temperature above 200 °C, the relative wear of SLC VNII NP 212 suspension application during sliding friction increases significantly. For an atmosphere of dry nitrogen and vacuum, the combined SLC in the Scharf $\text{MoS}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Au}$ magnetron deposition experiments shows a 4.7-fold decrease in relative wear and tear relative to SLC of pure MoS_2 of the usual composition. For magnetron sputtering similar in type to MoS_2 SLC and friction conditions at a contact temperature of 51–55 °C for a coating thickness of 1 μm , the relative wear during sliding friction in the Miyoshi experiments is 7.8 times less than with reversible friction in the Scharf experiments. The friction coefficient is 11.7 times higher.

EDN: FWDWJY, <https://elibrary/fwdwjy>

Keywords: solid lubricating coatings, tribotechnical characteristics, conditions of a normal atmosphere, various methods of application

Трибологически эффективные твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе MoS_2 нашли широкое применение в технических устройствах, функционирующих в экстремальных условиях, где невозможно использовать обычные смазочные материалы: масла и консистентные смазки. В первую очередь это относится к использованию указанных материалов в вакууме [1] (например, в космосе) при очень низкой температуре (например, в крионасосе), при наличии высокоэнергетического излучения (например, в термоядерных реакторах) или там, где загрязнение продукта обычными смазочными материалами недопустимо (например, в подшипниках оптических приборов) [2, 3].

ТСП на основе MoS_2 , напыленные магнетроном, хорошо зарекомендовали себя в условиях вакуума, обеспечивая наилучшие трибологические характеристики [4, 5] — низкие коэффициент трения $f_{\text{тр}}$ [6, 7] и относительную износостойкость [8], обусловленную слоистой структурой MoS_2 [9].

В условиях нормальной атмосферы, особенно при высокой относительной влажности, их антифрикционные характеристики и износостойкость снижаются. Зачастую работоспособность узлов трения с ТСП, предназначенных для эксплуатации в космосе, предварительно проверяют на Земле (наземные испытания и хранение), что требует подбора универсальных ТСП, функционирующих как в воздухе, так и в вакууме. В связи с этим для анализа выбраны условия трения в нормальной атмосфере (в том числе влажной) и среде сухого азота, мало отличающиеся от вакуумных.

При эксплуатации фрикционных сопряжений в космосе температура наружных поверхностей орбитальных станций изменяется в диапазоне $-170 \dots 150$ °C. Рассматриваемые типы ТСП широко используются в этих условиях. Полученные ранее универсальные корреляционные зависимости температуры трения от нагрузочно-скоростных параметров работы узла и термодинамические зависимости ресурса ТСП и коэффициента трения от температуры трения позволяют оценить искомые триботехнические характеристики при произвольном сочетании указанных факторов в условиях нормальной атмосферы и вакуума.

Растет спрос на экологически надежные ТСП, способные адаптироваться к различным условиям внешней среды. Например, если целью применения является снижение трения в космосе, часто спутники и ракеты-носители перед запуском продолжительное время находятся во влажной прибрежной среде, что потенциально подвергает движущиеся механические узлы воздействию влаги [10]. К известным легирующим добавкам относятся Ti, Al, Ni, Au, Pb, PbO и Sb_2O_3 .

Наличие этих добавок в составе ТСП может привести к увеличению его плотности, твердости и стойкости к окислению. Среди них пленки на основе MoS_2 , легированные Sb_2O_3 и Au, получают все большее применение в спутниках.

Реальные узлы трения указанных механизмов функционируют как в условиях чистого скольжения, так и реверсивного движения.

Цель работы — сравнительная оценка триботехнических характеристик пар трения с ТСП на основе MoS_2 магнетронного (МН) и

суспензионного (СН) нанесения и работающих по схемам чистого скольжения и возвратно-поступательного (реверсивного) движения.

Методы исследований. Проанализированы результаты исследований, приведенные в работе Т.В. Шарфа [10]. В качестве объекта исследования выступали зарубежные ТСП комбинированного состава $\text{MoS}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Au}$ (MoS_2 — 82 %, Sb_2O_3 — 11 %, Au — 7 %), напыленные на обе поверхности подложки из стали 440С методом магнетронного распыления Dayton Coatings Technology. Толщина ТСП, исследованного Шарпом (далее ТСП_Ш) составляла $\delta = 1$ мкм. Перед распылением композитного покрытия на подложки наносили адгезионный слой Ti толщиной 150 нм.

Трибологические испытания проводили на плоских поверхностях с помощью тестера линейного износа шарик-на-диске в среде сухого азота или нормальной атмосферы с относительной влажностью $w = 50$ % при скорости скольжения $v = 3,75$ мм/с [11, 12] (рис. 1). Длина следа от износа составляла 1,6 мм. В качестве контртела выступал шарик из коррозионно-стойкой стали 440С и Si_3N_4 диаметром 3,125 мм.

Для сравнения с триботехническими характеристиками ТСП_Ш рассматривали результаты исследования отечественного ТСП ВНИИ НП 212 (далее ТСП_{ВНИИ НП 212}) суспензионного нанесения в условиях нормальной атмосферы [13]. Оценивали относительную износостойкость и антифрикционные свойства ТСП. Трибологические испытания ТСП_{ВНИИ НП 212} на трение скольжения проводили на машине трения

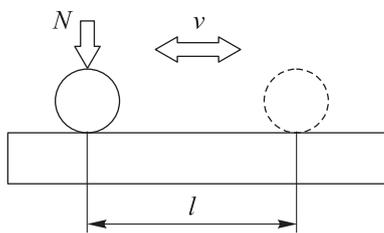


Рис. 1. Схема испытания пары трения с ТСП_Ш

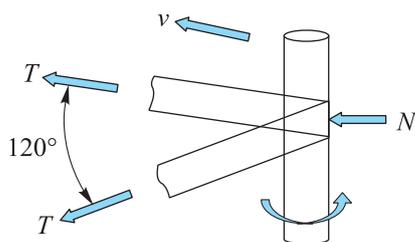


Рис. 2. Схема машины трения ИТК

ИТК конструкции К.И. Климова по схеме ролик — лента, схема которой приведена на рис. 2, где T — сила натяжения нити.

Трущуюся пару образовывали цилиндрический ролик диаметром 5 мм, длиной 50 мм и лента из нихрома толщиной 0,1 мм и шириной 4,5 мм. При вращении ролика с частотой $n = 800$ мин⁻¹ имело место трение скольжения между его поверхностью и лентой, сопровождающееся износом ТСП, нанесенного на ролик.

Скорость скольжения ролика по ленте $v = 0,21$ м/с. Контактная нагрузка $N = 2,94$ Н. С помощью машины трения ИТК определяли зависимость коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ от соответствующей температуры $T_{\text{тр}}$.

Для сравнения с триботехническими характеристиками ТСП_Ш в условиях нормальной атмосферы рассматривали результаты исследования пар трения с ТСП на основе MoS_2 и ТСП комбинированного состава $\text{MoS}_2 + \text{Ti}$, $\text{MoS}_2 + \text{Zr}$, $\text{MoS}_2 + \text{Cr}$ и $\text{MoS}_2 + \text{W}$, нанесенных методом замкнутого поля несбалансированного магнетронного распыления ионного типа (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating — CFUBMSIP), полученные Д.Г. Тиром [14–16].

Износостойкость и антифрикционные свойства ТСП, исследованные Тиром (далее ТСП_Т), оценивали при реверсивном движении (по схеме, аналогичной на рис. 1) шара диаметром $d = 5$ мм из твердого сплава ВК6 (WC — 94 %, Co — 6 %) относительно плоскости. Контактная нагрузка $N = 100$ Н. Скорость скольжения $v = 150$ мм/мин (в течение 1 с в каждом направлении на дорожке длиной $l = 2,5$ мм) [13, 15]. Все трибологические испытания проводили на воздухе при температуре 20...23 °С и относительной влажности $w = 30...40$ %.

Для сравнения с триботехническими характеристиками ТСП_Ш рассматривали результаты исследования К. Мисуоши [17], проанализированные в работах [16, 18]. Эксперименты проводили в условиях глубокого вакуума ($7 \cdot 10^{-7}$ Па) по схеме шар — диск (рис. 3) при скорости сколь-

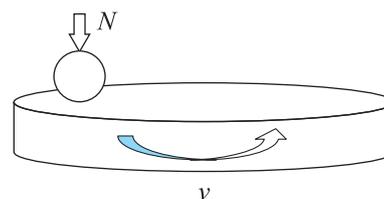


Рис. 3. Схема трибологических испытаний пары трения с ТСП на установке Мисуоши, работающей по схеме шар — диск

Таблица 1

Характеристики пар трения ТСП_М

Метод нанесения ТСП	Состав	Толщина δ, мкм
СН	MoS ₂ + полиамид-имидное связующее (остальные компоненты не раскрыты)	10 ± 4
МН	MoS ₂	1,0 ± 0,2

жения $v = 0,2$ м/с и нагрузке $N = 5,9$ Н. Диаметр шара, выполненного из стали 440С, составлял 6 мм.

Характеристики пар трения с ТСП разного состава, исследованных на установке Мисуоши (далее ТСП_М) по схеме шар — диск, приведены в табл. 1.

Результаты исследований. Результаты исследования Шарфа. По результатам трибологических испытаний Шарфа [4] пары трения с ТСП_Ш на основе MoS₂ и ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au в условиях нормальной атмосферы при относительной влажности $w = 50\%$ и в среде сухого азота построены зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ от числа циклов нагружения W и пути трения L (рис. 4).

Относительный износ определяли по выражению

$$И = \frac{V_{изн}}{NL},$$

где $V_{изн}$ — объем износа, мм³.

Зависимости относительного износа $И$ пары трения с ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au от числа циклов нагружения W приведены на рис. 5. Там же показаны значения коэффициентов трения в установившемся режиме.

Анализ данных, приведенных на рис. 4 и 5, позволяет заключить следующее. У ТСП_Ш на основе MoS₂ число циклов нагружения $W \leq 4000$, а у ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au $W > 10\,000$. В условиях нормальной атмосферы коэффициент трения ТСП_Ш на основе MoS₂ $f_{тр} = 0,163$, в среде сухого азота он снижается с $f_{тр} = 0,020$ на этапе приработки до $f_{тр} = 0,006$ в установившемся режиме трения. В условиях нормальной атмосферы на этапе приработки коэффициент трения ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au $f_{тр} = 0,127$, в установившемся режиме трения $f_{тр} = 0,007$. В среде сухого

азота $f_{тр}$ снижается с 0,020 на этапе приработки до 0,007 в установившемся режиме. Относительный износ ТСП_Ш на основе MoS₂ почти в 10 раз больше, чем у ТСП_Ш комбинированного состава.

Результаты исследования триботехнических характеристик ТСП_Ш приведены в табл. 2.

Анализ эффективности ТСП_Ш и ТСП другого типа проводили, сравнивая значения относи-

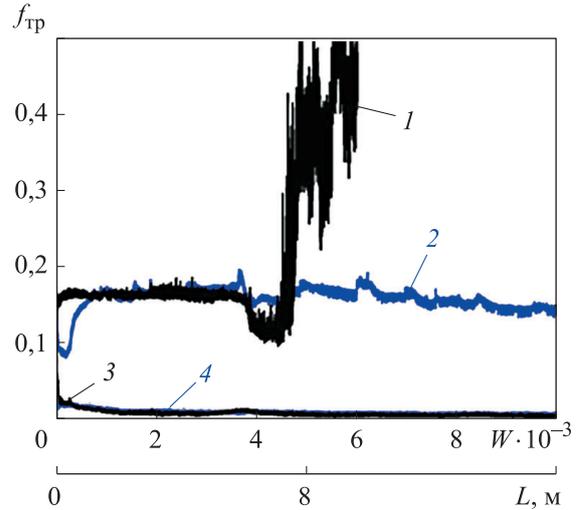


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ от пути трения L и числа циклов нагружения W пар с ТСП_Ш в различных средах: 1 и 3 — ТСП_Ш на основе MoS₂ в условиях нормальной атмосферы при $w = 50\%$ и в среде сухого азота; 2 и 4 — ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au (2, 4) в условиях нормальной атмосферы при $w = 50\%$ и в среде сухого азота

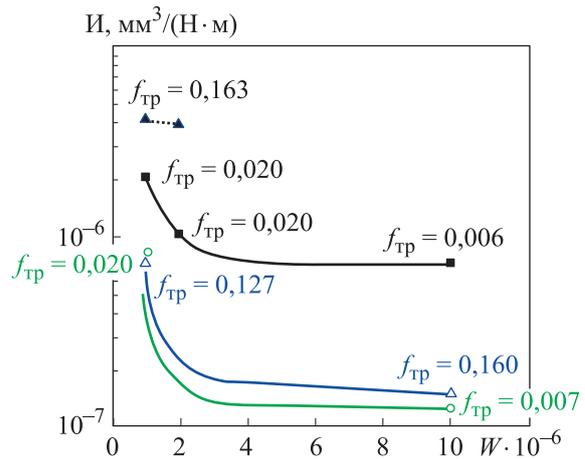


Рис. 5. Зависимости относительного износа $И$ от числа циклов нагружения W пар с ТСП_Ш в различных средах: ▲ и ■ — ТСП_Ш на основе MoS₂ в условиях нормальной атмосферы при $w = 50\%$ и в среде сухого азота; △ и ○ — ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au в условиях нормальной атмосферы при $w = 50\%$ и в среде сухого азота

Таблица 2

Результаты исследования триботехнических характеристик ТСП_{III}

Состав ТСП _{III}	Среда	Число циклов нагружения	$I \cdot 10^6, \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	$f_{\text{тр}}$
MoS ₂	Нормальная атмосфера	2000	4,00/-	0,163/-
		1000	2,00/-	0,020/-
	Сухой азот	2000	1,00/-	0,020/-
		3000	0,70/-	0,020/-
		10 000	-/0,70	-/0,006
MoS ₂ + Sb ₂ O ₃ + Au	Нормальная атмосфера	1000	0,80/-	0,127
		10 000	-/0,15	-/0,007
	Сухой азот	1000	0,8/-	0,020/-
		10 000	-/0,15	-/0,007

Примечание. В числителе дроби указаны значения для режима приработки, в знаменателе — для установившегося режима трения.

тельного износа и коэффициента трения пары в условиях нормальной атмосферы и вакуума при расчетных значениях контактной температуры трения, являющейся определяющим параметром нагруженности фрикционного контакта. Условия вакуума приняты близкими к среде сухого азота, так как в работе [10] прибор для испытания помещался в защищенную от атмосферного воздействия камеру с точным контролем точки росы и содержания кислорода.

Измерения выполняли в среде сухого азота ($\text{O}_2 < 10 \text{ ppm}$, $\text{H}_2\text{O} < 100 \text{ ppm}$) и в условиях нормальной атмосферы при $w = 50 \%$. В работе [11] отмечено, что в среде сухого азота содержался кислород. Давление кислорода в камере поддерживалось на уровне ниже пяти частей на миллион. Поэтому для расчета температуры трения определяли контактное давление p .

Сначала оценивали контактное давление по результатам трибологических испытаний ТСП_{III} на основе MoS₂ (см. табл. 2). Схема изношенной дорожки трения при реверсивном движении пары с ТСП_{III} показана на рис. 6.

Результаты расчета контактного давления пары трения с ТСП_{III} на основе MoS₂ в условиях

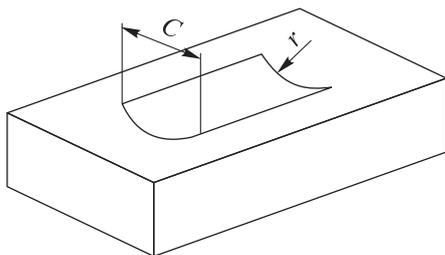


Рис. 6. Схема изношенной дорожки трения при реверсивном движении пары с ТСП_{III}

нормальной атмосферы на этапе приработки при числе циклов $W = 2000$ приведены в табл. 3. Хорду износа C (см. рис. 6) рассчитывали с помощью программы (<https://planetcalc.ru/1421/>). Радиус пятна контакта определяли по формуле $r = C/2$.

Результаты расчета контактного давления пары трения с ТСП_{III} на основе MoS₂ при испытаниях в среде сухого азота приведены в табл. 4.

Для ТСП_{III} на основе MoS₂, работающего в условиях нормальной атмосферы в режиме приработки расчетное контактное давление $p = 202,2 \text{ МПа}$.

Таблица 3

Результаты расчета контактного давления пары трения с ТСП_{III} на основе MoS₂ в условиях нормальной атмосферы на этапе приработки

Параметр	Значение
Число циклов нагружения в начале/конце режима приработки W	0/2000
Средний относительный износ $I_{\text{ср}}$, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	$4 \cdot 10^{-6}$
Путь трения L , м	3,2
Объем износа $V_{\text{изн}}$, мм^3	$1,28 \cdot 10^{-6}$
Площадь поперечного сегмента изношенной зоны $S_{\text{сегм}}$, мм^2	$8 \cdot 10^{-7}$
Хорда износа C , мм	0,0248
Радиус пятна контакта r , мм	0,0124
Площадь пятна контакта $S_{\text{конт}}$, мм^2	$4,83 \cdot 10^{-4}$
Контактное давление p , МПа	207,1

Таблица 4

Результаты расчета контактного давления для пары трения с ТСП_{III} на основе MoS₂ в среде сухого азота

Параметр	Режим приработки на этапах				Установившийся режим	Весь период
	1	2	3	1-3		
W	0/1000	1000/2000	2000/3000	–	3000	0
$I \cdot 10^6, \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	10,0/2,0	2,0/1,0	1,0/0,7	–	10 000	10 000
$I_{\text{ср}} \cdot 10^6, \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	6,00	1,50	0,85	–	0,70	–
$V_{\text{изн}} \cdot 10^6, \text{мм}^3$	–	–	–	1,34	0,11	1,45
$S_{\text{сегм}} \cdot 10^7, \text{мм}^2$	–	–	–	8,35	0,70	9,05
$C, \text{мм}$	–	–	–	0,0251	0,0109	0,0257
$r, \text{мм}$	–	–	–	0,0126	0,00545	0,0128
$S_{\text{конт}} \cdot 10^4, \text{мм}^2$	–	–	–	4,950	0,933	5,170
$p, \text{МПа}$	–	–	–	202,2	–	193

Примечание. В числителе дроби указаны значения в начале этапа, в знаменателе — в конце.

По результатам расчета контактного давления пар трения с ТСП_{III} состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au в условиях нормальной атмосферы и в среде сухого азота установлено, что на этапе приработки $p = 632 \text{ МПа}$, а на этапе установившегося режима трения $p = 544 \text{ МПа}$.

Далее определяли контактную температуру трения с помощью полученной в работе [16] для диапазонов $p = 5,6 \dots 67,2 \text{ МПа}$ и $v = 0,11 \dots 0,25 \text{ м/с}$ термокорреляционной зависимости

$$T_{\text{тр}} = 67,27 \cdot 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,11p^2. \quad (1)$$

Так как исследуемые нагрузочно-скоростные параметры пары трения с ТСП_{III} выходят за пределы указанных диапазонов выполнена корректировка зависимости (1) с пересчетом значений $T_{\text{тр}}$. Схема первого и второго этапов корректировки показана на рис. 7.

При первой корректировке расчет проводили для основного контактного давления $p = 36,6 \text{ МПа}$. Ординаты точек кривой ВОД рассчитывали путем преобразования термокорреляционной зависимости (1), которая для указанного давления приобрела вид

$$T_{\text{тр}} = 72,08e^{1,449v} - 52,08e^{-1198v}.$$

Точка Г на рис. 7 соответствовала значению скорости скольжения, принятому при исследовании ТСП_{III}, а ордината точки Е — температуре фрикционного контакта при нулевой скорости скольжения, которую приняли равной 20 °С.

При второй корректировке сначала получили уравнение кривой АОВ для основной скорости скольжения $v = 0,18 \text{ м/с}$

$$T_{\text{тр}} = 49,48 + 1,62p - 0,011p^2. \quad (2)$$

После расчета разности температур $T_{\text{тр}}$ в точках О и Г уравнение (2) преобразовывали в уравнение кривой ЖГЕ с последующим расширением области его определения до искомых значений контактного давления для ТСП_{III}. Результаты расчета температуры трения $T_{\text{тр}}$ пары

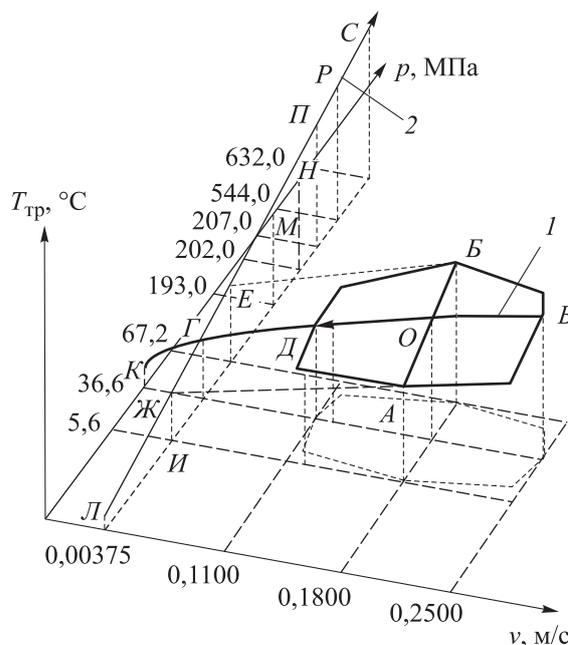


Рис. 7. Схема первой (1) и второй (2) корректировок температуры трения $T_{\text{тр}}$ при реверсивном движении ТСП_{III}

Таблица 5

Значения температуры трения пары с ТСП_{III} разного состава при реверсивном движении

Состав ТСП	Среда	p , МПа	$T_{тр}$, °С
MoS ₂	Нормальная атмосфера	207/-	106/-
	Сухой азот	202/193	105/104
MoS ₂ + Sb ₂ O ₃ + Au	Нормальная атмосфера	632/544	128/125
	Сухой азот	632/544	128/125

Примечание. В числителе дроби указаны значения для режима приработки, в знаменателе — для установившегося режима трения.

с ТСП_{III} разного состава при реверсивном движении приведены в табл. 5.

Результаты исследования ТСП_{ВНИИ НП 212}. Для исследования ТСП_{ВНИИ НП 212}, состоящего из MoS₂ и мочевино-формальдегидного связующего, использованы результаты трибологических испытаний, полученные на приборе трения ИТК (см. рис. 2) при трении скольжения по схеме ролик — лента [13]. Согласно рекомендациям ВНИИ НП [19], толщина ТСП суспензионного нанесения $\delta = 20$ мкм. Принята следующая динамика износа ТСП_{ВНИИ НП 212} [20] — в режиме приработки — 80 % (18 мкм), в установившемся режиме трения — 20 %.

С учетом параметров испытаний рассчитаны значения относительной интенсивности изнашивания I при различных значениях температуры трения, приведенные в табл. 6.

Зависимости относительного износа ТСП_{ВНИИ НП 212} в условиях нормальной атмосферы от температуры трения показаны на рис. 8.

Термокорреляционные характеристики пары трения с ТСП_T в условиях нормальной атмосферы. Результаты трибологических испытаний ТСП_T на основе MoS₂, нанесенные ме-

тодом CFUBMSIP, проанализированные в трудах [14–16], приведены в работе [16].

Сравнительная оценка относительного износа и коэффициента трения для ТСП разного состава при испытаниях на скольжение и реверсивное движение в условиях нормальной атмосферы. Результаты трибологических испытаний ТСП приведены в табл. 7.

С помощью полученных ранее термокорреляционных характеристик пар трения ТСП_{III}, ТСП_T и ТСП_{ВНИИ НП 212} в условиях нормальной атмосферы построены зависимости относительного износа I от температуры трения $T_{тр}$, приведенные на рис. 9. Видно, что при температуре трения $T_{тр} < 150$ °С наименьший относительный износ имеет ТСП_{ВНИИ НП 212} при трении скольжения. В диапазоне $T_{тр} = 150...200$ °С у всех ТСП относительный износ примерно одинаковый и составляет $(1,80...8,00) \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н·м). Если $T_{тр} > 200$ °С, то относительный износ ТСП_{ВНИИ НП 212} при трении скольжения значительно возрастает.

Таблица 6

Значения относительного износа пары трения с ТСП_{ВНИИ НП 212} при различных значениях температуры трения

Температура трения T , °С	Ресурс, мин	Относительный износ $I \cdot 10^6$, мм ³ /(Н·м)	
		в режиме приработки	при установившемся режиме трения
40	480	14,30	1,60
100	2030	3,40	0,37
200	700	9,84	1,09
300	100	68,9	7,65

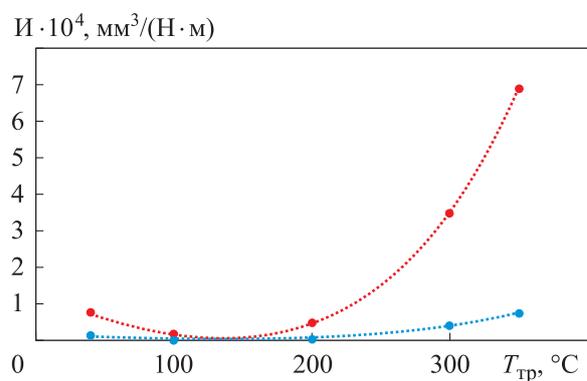


Рис. 8. Зависимости относительного износа I ТСП_{ВНИИ НП 212} в условиях нормальной атмосферы от температуры трения $T_{тр}$:
 • и • — $I = f(T_{тр})$ в режиме приработки и установившемся режиме трения;
 и — полиномиальные зависимости $I = f(T_{тр})$ в режиме приработки и установившемся режиме трения

Таблица 7

Результаты трибологических испытаний ТСП на трение скольжения и реверсивное трение в условиях нормальной атмосферы

Тип ТСП	Состав ТСП	Метод нанесения ТСП	Вид движения	$T_{тр}, °C$	$I \cdot 10^6, \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	$f_{тр}$
ТСП _Ш	MoS ₂	МН	Реверсивное	73,7	4,00	0,163
ТСП _Ш	MoS ₂ + Sb ₂ O ₃ + Au	МН		188,0	0,15	0,160
ТСП _Т	MoS ₂	CFUBMSIP		148,0	0,80	0,020
ТСП _Т	MoS ₂ + Ti			157,0	0,41	0,038
ТСП _Т	MoS ₂ + Zr			167,0	0,18	0,039
ТСП _Т	MoS ₂ + Cr			154,0	0,46	0,029
ТСП _Т	MoS ₂ + W			155,0	0,32	0,028
ТСПВНИИ НП 212	MoS ₂ + мочевино-формальдегидное связующее	СН	Скольжение	40,0...350,0	1,09...15,30	0,0373...0,200

В целом тип ТСП и вид трения при трибологических испытаниях не оказывают существенного влияния на относительный износ.

Термокорреляционные зависимости коэффициента трения при установившемся режиме трения для ТСП разного типа приведены на рис. 10. Видно, что при $T_{тр} < 100 °C$ коэффициенты трения ТСП_{ВНИИ НП 212} в условиях трения скольжения больше, чем у ТСП магнетронного нанесения для условий реверсивного движения, за исключением ТСП_Ш. С понижением $T_{тр}$ коэффициент трения ТСП_{ВНИИ НП 212} существенно возрастает.

Сравнительная оценка относительного износа и коэффициента трения для ТСП разного состава при испытаниях на скольжение и реверсивное движение в условиях вакуума и среде сухого азота. Сравнение относительного износа и антифрикционных характеристик ТСП_Ш в среде сухого азота проводили, используя полученные ранее данные для условий вакуума (принятых близкими к среде сухого азота) [16–18].

Трибологические испытания в экспериментах Мисуоки проводили для ТСП_М на основе MoS₂ суспензионного и магнетронного нанесения при трении скольжения. Результаты трибологических испытаний исследованных ТСП

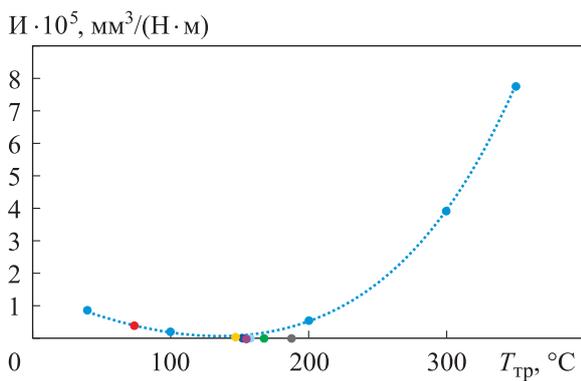


Рис. 9. Зависимости относительного износа I от температуры трения $T_{тр}$ при скольжении ТСП_{ВНИИ НП 212} (●) и реверсивном движении ТСП_Ш, ТСП_Т разного состава в условиях нормальной атмосферы:

- — ТСП_Ш на основе MoS₂;
- — ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au;
- — ТСП_Т на основе MoS₂;
- , ● и ● — ТСП_Т состава MoS₂ + Ti, MoS₂ + Zr и MoS₂ + Cr соответственно

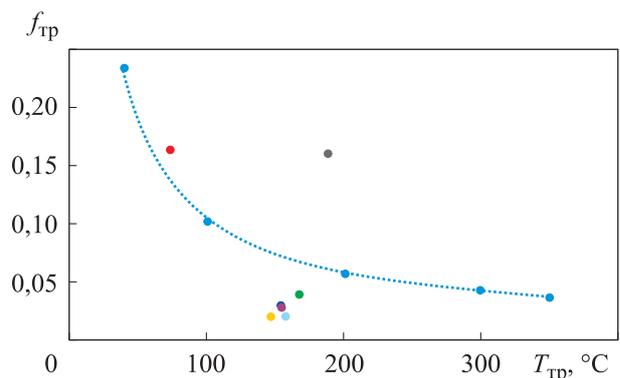


Рис. 10. Зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ от температуры $T_{тр}$ при скольжении ТСП_{ВНИИ НП 212} (●) и реверсивном движении ТСП_Ш, ТСП_Т разного состава в условиях нормальной атмосферы:

- — ТСП_Ш на основе MoS₂;
- — ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au;
- — ТСП_Т на основе MoS₂;
- , ● и ● — ТСП_Т состава MoS₂ + Ti, MoS₂ + Zr, MoS₂ + Cr и MoS₂ + W соответственно

Таблица 8

Результаты трибологических испытаний ТСП на основе MoS₂ в условиях вакуума и сухого азота

Тип ТСП	Состав ТСП	Метод нанесения ТСП	Вид движения	$T_{тр}$, °C	$I \cdot 10^7$, мм ³ /(Н·м)	$f_{тр}$
ТСП _Ш	MoS ₂	МН	Реверсивное	51,4	7,0	0,006
	MoS ₂ + Sb ₂ O ₃ + Au			319,0	1,5	0,007
ТСП _М	MoS ₂	СН	Скольжение	55,3	0,6	0,045
		МН		73,8	0,9	0,070

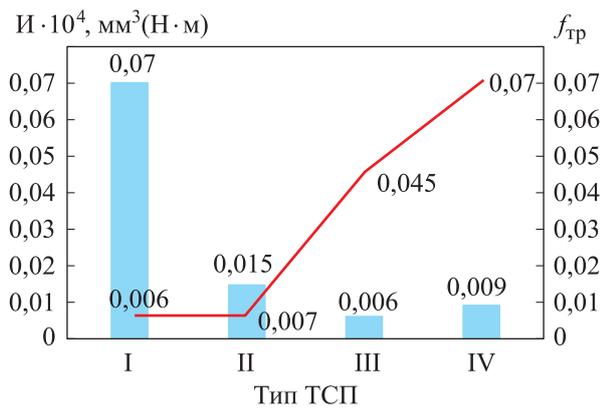


Рис. 11. Диаграммы относительного износа I (■) и коэффициента трения $f_{тр}$ (—) пар с ТСП_Ш при реверсивном движении и с ТСП_М при скольжении в условиях вакуума: I — ТСП_Ш на основе MoS₂, МН; II — ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au, МН; III — ТСП_М СН на основе MoS₂, МН; IV — ТСП_М на основе MoS₂, МН

при трении скольжения и реверсивном движении при испытаниях в условиях вакуума и сухого азота приведены в табл. 8.

На основе данных табл. 8 построены зависимости относительного износа и коэффициента трения пар с ТСП_Ш при реверсивном движении и с ТСП_М при скольжении в условиях вакуума, приведенные на рис. 11. Видно, что у ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au при реверсивном движении относительный износ в 4,7 раза меньше, чем у ТСП_Ш на основе MoS₂. Для близких по типу ТСП на основе MoS₂ магнетронного нанесения и по условиям трения при температуре $T_{тр} = 51 \dots 55$ °C и толщине $\delta = 1$ мкм относительный износ при скольжении пар с ТСП_М в 7,8 раза меньше, а коэффициент трения в 11,7 раз больше, чем при реверсивном движении пар с ТСП_Ш.

Выводы

1. Выполнена сравнительная оценка относительного износа и коэффициента трения пар трения с ТСП на основе MoS₂ и состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au магнетронного и суспензионного нанесения, работающих по схемам чистого скольжения и реверсивного движения в условиях нормальной атмосферы, сухого азота и вакуума.

2. По результатам, полученным в условиях нормальной атмосферы, установлено следующее:

- при температуре $T_{тр} < 150$ °C наименьший относительный износ имеют ТСП_{ВНИИ} НП 212 суспензионного нанесения при трении скольжения;
- при $T_{тр} = 150 \dots 200$ °C относительный износ всех покрытий одинаковый и составляет $(1,80 \dots 8,00) \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н·м);
- при $T_{тр} > 200$ °C относительный износ ТСП_{ВНИИ} НП 212 при трении скольжения значительно возрастает;
- в целом тип ТСП и вид трения не оказывают существенного влияния на относительный износ.

3. По результатам, полученным в условиях вакуума и среде сухого азота, выявлено следующее:

- при реверсивном движении относительный износ ТСП_Ш состава MoS₂ + Sb₂O₃ + Au в 4,7 раза меньше, чем у ТСП_Ш на основе MoS₂;
- для близких по типу ТСП на основе MoS₂ магнетронного нанесения и по условиям трения при температуре $T_{тр} = 51 \dots 55$ °C и толщине $\delta = 1$ мкм относительный износ при скольжении пар с ТСП_М в 7,8 раза меньше, а коэффициент трения в 11,7 раз больше, чем при реверсивном движении пар с ТСП_Ш.

Литература

- [1] Seynstaal A., Krauß S., Bitzek E. et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of magnetron-sputtered MoS₂ solid lubricant coatings deposited under industrial conditions. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 455, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11040455>
- [2] Sun X. Solid lubricants for space mechanisms. In: Encyclopedia of tribology. Springer, 2013, pp. 3165–3172, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1230
- [3] Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A. et al. Solid lubrication with MoS₂: a review. *Lubricants*, 2019, vol. 7, no. 7, art. 57, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants7070057>
- [4] Scharf T.W., Prasad S.V. Solid lubricants: a review. *J. Mater. Sci.*, 2013, vol. 48, no. 2, pp. 511–531, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>
- [5] Chen Z., He X., Xiao C. et al. Effect of humidity on friction and wear—a critical review. *Lubricants*, 2018, vol. 6, no. 3, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants6030074>
- [6] Martin J.M., Donnet C., Le Mogne T. et al. Superlubricity of molybdenum disulphide. *Phys. Rev. B*, 1993, vol. 48, no. 14, pp. 10583–10586, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.10583>
- [7] Martin J.M., Pascal H., Donnet C. et al. Superlubricity of MoS₂: crystal orientation mechanisms. *Surf. Coat. Technol.*, 1994, vol. 68–69, pp. 427–432, doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90197-x](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90197-x)
- [8] Donnet C., Martin J.M., Le Mogne T. et al. Super-low friction of MoS₂ coatings in various environments. *Tribol. Int.*, 1996, vol. 29, no. 2, pp. 123–128, doi: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00094-K](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00094-K)
- [9] Hilton M.R., Fleischauer P.D. TEM lattice imaging of the nanostructure of early-growth sputter-deposited MoS₂ solid lubricant films. *J. Mater. Res.*, 1990, vol. 5, no. 2, pp. 406–421, doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.0406>
- [10] Scharf T.W., Kotula P.G., Prasad S.V. Friction and wear mechanisms in MoS₂/Sb₂O₃/Au nanocomposite coatings. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 12, pp. 4100–4109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.040>
- [11] Prasad S.V., Dugger M.T., Christenson T.R. et al. LIGA microsystems: surface interactions, tribology, and coatings. *J. Manuf. Process.*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 107–116, doi: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70064-X](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70064-X)
- [12] Prasad S.V., Scharf T.W., Kotula P.G. et al. Application of diamond-like nanocomposite tribological coatings on LIGA microsystem parts. *J. Microelectromechanical Syst.*, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 695–704, doi: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2009.2016284>
- [13] Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. *Твердые дисульфидмолибденовые смазки*. Москва, Химия, 1966. 152 с.
- [14] Teer D.G. *Magnetron sputter ion plating*. Patent GB 2258343. Заявл. 02.09.1992, опубл. 03.02.1993.
- [15] Bellido-Gonzalez V., Jones A.H.S., Hampshire J. et al. Tribological behaviour of high performance MoS₂ coatings produced by magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 97, no. 1–3, pp. 687–693, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00546-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00546-X)
- [16] Хопин П.Н. *Прогнозирование триботехнических характеристик фрикционных сопряжений с твердосмазочными покрытиями*. Москва, МАИ, 2023. 160 с.
- [17] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. NASA/TM-1999-209088. Glenn Research Center, 1999. 30 p.
- [18] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термодинамических зависимостей. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 7, с. 317–320.
- [19] Сентюрихина Л.Н., Рубцова З.С. *Инструкция по нанесению твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, на поверхности трения*. Москва, Химия, 1967. 12 с.
- [20] Гамуля Г.Д., Добровольская Г.В., Лебедева И.Л. и др. Об ориентировке частиц MoS₂ на поверхности трения твердосмазочных покрытий. *Машиноведение*, 1978, № 6, с. 70–75.

References

- [1] Seynstahl A., Krauß S., Bitzek E. et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of magnetron-sputtered MoS₂ solid lubricant coatings deposited under industrial conditions. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 455, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11040455>
- [2] Sun X. Solid lubricants for space mechanisms. In: Encyclopedia of tribology. Springer, 2013, pp. 3165–3172, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1230
- [3] Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A. et al. Solid lubrication with MoS₂: a review. *Lubricants*, 2019, vol. 7, no. 7, art. 57, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants7070057>
- [4] Scharf T.W., Prasad S.V. Solid lubricants: a review. *J. Mater. Sci.*, 2013, vol. 48, no. 2, pp. 511–531, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>
- [5] Chen Z., He X., Xiao C. et al. Effect of humidity on friction and wear—a critical review. *Lubricants*, 2018, vol. 6, no. 3, art. 74, doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants6030074>
- [6] Martin J.M., Donnet C., Le Mogne T. et al. Superlubricity of molybdenum disulfide. *Phys. Rev. B*, 1993, vol. 48, no. 14, pp. 10583–10586, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.10583>
- [7] Martin J.M., Pascal H., Donnet C. et al. Superlubricity of MoS₂: crystal orientation mechanisms. *Surf. Coat. Technol.*, 1994, vol. 68-69, pp. 427–432, doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90197-x](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90197-x)
- [8] Donnet C., Martin J.M., Le Mogne T. et al. Super-low friction of MoS₂ coatings in various environments. *Tribol. Int.*, 1996, vol. 29, no. 2, pp. 123–128, doi: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00094-K](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00094-K)
- [9] Hilton M.R., Fleischauer P.D. TEM lattice imaging of the nanostructure of early-growth sputter-deposited MoS₂ solid lubricant films. *J. Mater. Res.*, 1990, vol. 5, no. 2, pp. 406–421, doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.0406>
- [10] Scharf T.W., Kotula P.G., Prasad S.V. Friction and wear mechanisms in MoS₂/Sb₂O₃/Au nanocomposite coatings. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 12, pp. 4100–4109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.03.040>
- [11] Prasad S.V., Dugger M.T., Christenson T.R. et al. LIGA microsystems: surface interactions, tribology, and coatings. *J. Manuf. Process.*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 107–116, doi: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70064-X](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70064-X)
- [12] Prasad S.V., Scharf T.W., Kotula P.G. et al. Application of diamond-like nanocomposite tribological coatings on LIGA microsystem parts. *J. Microelectromechanical Syst.*, 2009, vol. 18, no. 3, pp. 695–704, doi: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2009.2016284>
- [13] Sentyurikhina L.N., Oparina E.M. *Tverdye disulfidmolibdenovye smazki* [Solid disulfide-molybdenum lubricants]. Moscow, Khimiya Publ., 1966. 152 p. (In Russ.).
- [14] Teer D.G. *Magnetron sputter ion plating*. Patent GB 2258343. Appl. 02.09.1992, publ. 03.02.1993.
- [15] Bellido-Gonzalez V., Jones A.H.S., Hampshire J. et al. Tribological behaviour of high performance MoS₂ coatings produced by magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, vol. 97, no. 1-3, pp. 687–693, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00546-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00546-X)
- [16] Khopin P.N. *Prognozirovanie tribotekhnicheskikh kharakteristik friktsionnykh sopryazheniy s tverdostmazochnymi pokrytiyami* [Forecasting of tribotechnical characteristics of friction couplings with hard lubricating coatings]. Moscow, MAI Publ., 2023. 160 p. (In Russ.).
- [17] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. Friction and wear properties of selected solid lubricating films. NASA/TM-1999-209088. Glenn Research Center, 1999. 30 p.
- [18] Khopin P.N. An assessment of operability of friction couples with solid lubricating coatings in vacuum conditions on the basis of thermocorrelation dependences. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making], 2017, no. 7, pp. 317–320. (In Russ.).
- [19] Sentyurikhina L.N., Rubtsova Z.S. *Instruktsiya po naneseniyu tverdyykh smazochnykh pokrytiy, sodержashchikh disulfid molibdena, na poverkhnosti treniya* [Instructions for applying solid lubricants containing molybdenum disulfide to friction surfaces]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 12 p. (In Russ.).

- [20] Gamulya G.D., Dobrovolskaya G.V., Lebedeva I.L. et al. On the orientation of MoS₂ particles on the friction surface of hard-lubricating coatings. *Mashinovedenie*, 1978, no. 6, pp. 70–75. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.06.2025

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, 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, 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 триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий различных методов нанесения и условий трения применительно к испытаниям в нормальной атмосфере и вакууме. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 106–117.

Please cite this article in English as:

Khopin P.N., Mishakov S.Yu. Comparative assessment of tribotechnical characteristics of hard-lubricating coatings of various application methods and friction conditions in relation to tests in a normal atmosphere and in a vacuum. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 2, pp. 106–117.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию «Применение цифровых технологий промышленной логистики на примере нефтеперерабатывающих заводов»

Авторы: М.Н. Захаров, А.С. Саркисов

Рассмотрены основные вопросы использования цифровых технологий в задачах планирования нефтепереработки. Теоретический материал иллюстрируется примерами, связанными с работой нефтеперерабатывающих заводов.

Для студентов, обучающихся по инженерно-экономическим специальностям, и специалистов, участвующих в планировании капитальных вложений, подготовке финансовых и инвестиционных решений в области топливно-энергетического комплекса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>