

УДК 621.891:519.28

doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-54-65

Сравнительная оценка триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий, нанесенных методом замкнутого поля несбалансированного магнетронно-ионного распыления, для различных условий функционирования

П.Н. Хопин, О.Б. Сильченко

МАИ

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

P.N. Khopin, O.B. Silchenko

Moscow Aviation Institute

Проведена сравнительная оценка триботехнических характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями (ТСП) на основе MoS_2 , полученными методом суспензионного нанесения, типа ВНИИ НП 212 и ТСП, нанесенных методом замкнутого поля несбалансированного магнетронно-ионного распыления (closed field unbalanced magnetron sputter ion plating — CFUBMSIP), — ТСП_{CFUBMSIP} — комбинированного состава $\text{MoS}_2 + \text{Ti}$, $\text{MoS}_2 + \text{Zr}$, $\text{MoS}_2 + \text{Cr}$, $\text{MoS}_2 + \text{W}$. Установлено, что в нормальных атмосферных условиях в режимах трения, соответствующих контактной температуре трения 157°C , у ТСП_{CFUBMSIP} 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_{CFUBMSIP} при переходе от нормальных атмосферных условий к воде составило 2,98. В нормальных атмосферных условиях и воде коэффициент трения ТСП_{CFUBMSIP} находится в диапазоне 0,02...0,04, а в масляной среде — в интервале 0,03...0,08. Выявлено, что ТСП_{CFUBMSIP} на основе MoS_2 в нормальных атмосферных условиях, воде и масле практически неработоспособно.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, триботехнические характеристики, несбалансированное магнетронно-ионное распыление, суспензионное нанесение, нормальные атмосферные условия, масляная среда

This paper presents a comparative assessment of the tribotechnical characteristics of friction pairs with solid lubricant coatings (SLC) based on the MoS_2 suspension application of VNII NP 212 and SLC_{CFUBMSIP} deposited by the closed field unbalanced magnetron sputter ion plating (CFUBMSIP) of combined compositions $\text{MoS}_2 + \text{Ti}$, $\text{MoS}_2 + \text{Zr}$, $\text{MoS}_2 + \text{Cr}$, $\text{MoS}_2 + \text{W}$. It was established that under normal atmospheric conditions in the friction

modes corresponding to the contact friction temperature of 157 °C, the life of $SLC_{CFUBMSIP}$ was 42.1 % higher, and the coefficient of friction (f_{fr}) was on average 2 times lower than that of SLC VNII NP 212. The average value of the life reduction coefficient for $SLC_{CFUBMSIP}$ during the transition from normal atmospheric conditions to water was 2.98. Under normal atmospheric conditions and in water, the $SLC_{CFUBMSIP}$ coefficient of friction was in the range of 0.02–0.04, and in an oil environment it ranged from 0.03 to 0.08. $SLC_{CFUBMSIP}$ based on pure MoS₂ in normal atmospheric conditions, in water and oil was practically unusable.

Keywords: solid lubricant coatings, tribotechnical indicators, unbalanced magnetron sputter ion plating, suspension application, normal atmosphere, oil medium

В настоящее время в инструментальной промышленности применяют композитные твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе MoS₂/Ti (обозначаемые как MoST) и другого состава, полученные методом несимметричного магнетронного распыления в замкнутом поле [1]. Такие покрытия, наносимые на режущий инструмент и штамповую оснастку, используются в автомобильной промышленности при крупносерийном производстве.

Традиционно для узлов трения автономной смазки применяют отечественные (ВНИИ НП, ВАП) и зарубежные (например, фирмы Molykote) марки ТСП, получаемые методом суспензионного нанесения (СН) [2]. Однако сравнительная оценка триботехнических характеристик таких покрытий не осуществлялась.

Цель работы — оценка триботехнических характеристик указанных зарубежных ТСП комбинированного состава в сравнении с отечественными ТСП суспензионного типа со связующими смолами, в том числе для условий скользящего контакта.

Для узлов трения, автономно функционирующих как в нормальных атмосферных условиях, так и в условиях вакуума, широко используют ТСП с органическими и неорганическими связующими и наполнителями типа MoS₂, графита, политетрафторэтилена и др. Традиционно эти ТСП наносят на детали методом СН.

ТСП, полученные методом суспензионного нанесения (далее ТСП_{СН}), применяют:

- в условиях высокого и сверхвысокого вакуума, радиации и теплового излучения [3–7];
- в узлах трения, работающих при экстремальных нагрузках, соизмеримых с пределами текучести металлов [7, 8];
- при малой скорости скольжения, недостаточной для образования смазочного гидродинамического клина при трении со смазкой, в качестве которой выступают минеральные и синтетические масла [8, 9];

- в широком диапазоне отрицательных и положительных рабочих температур [7, 10].

Основными недостатками ТСП_{СН} являются:

- определенный ресурс покрытий, зависящий от нагрузочно-скоростных и температурных условий функционирования;
- определенные границы температурного применения, зависящие в основном от типа связующего вещества;
- в большинстве случаев неработоспособность в масляной среде.

В 80–90-е годы прошлого века был разработан метод магнетронного напыления ТСП. В 1996–1997 гг. он был усовершенствован, и предложены ТСП на основе MoS₂, нанесенные методом замкнутого поля несбалансированного магнетронного распыления ионного типа (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating — CFUBMSIP) [11–13]. Толщина ТСП, полученных методом CFUBMSIP (далее ТСП_{CFUBMSIP}), составляла 1 мкм. При этом у них сохранялись очень низкие антифрикционные характеристики в сочетании с высокой износостойкостью и возможностью функционирования в воде и масляной среде.

Методы исследований. Параметры нанесения ТСП методом CFUBMSIP. В работах [14, 15] для распыления ТСП методом CFUBMSIP использована установка UDP-550 и методика фирмы Teer Coatings Ltd. Покрытие наносилось при смещении по постоянному току на образцы, вращающиеся между четырьмя мишенями, при различных условиях осаждения.

Наилучшие характеристики ТСП_{CFUBMSIP} были достигнуты с помощью запатентованного метода осаждения [16], в котором мишени дисульфида молибдена и титана распылялись совместно. Покрытие комбинированного состава на основе MoS₂ наносилось на различные подложки: кремний и инструментальную сталь AISI M42 твердостью 800 HV.

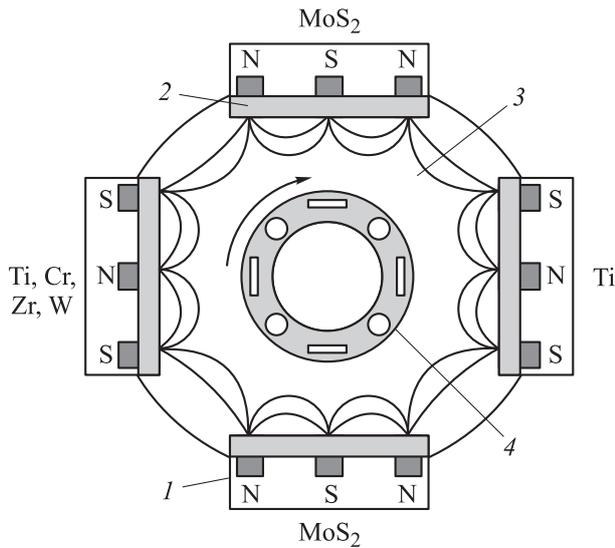


Рис. 1. Схема четырехмагнетронной камеры при нанесении ТСП методом CFUBMSIP: 1 — магнетрон; 2 — мишень; 3 — замкнутое магнитное поле системы; 4 — держатель образца

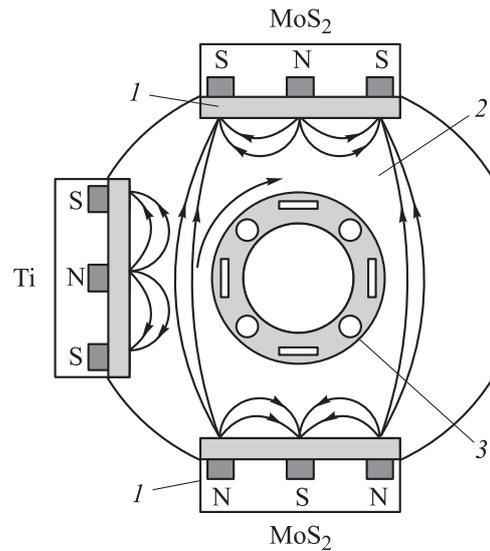


Рис. 2. Схема нанесения ТСП типа MoST: 1 — несбалансированная магнетронная мишень; 2 — замкнутое магнитное поле системы; 3 — стол с образцами

В работе [13] применен модифицированный метод осаждения. Магнетроны внутри камеры располагали так, чтобы использовались две мишени из дисульфида молибдена, одна из титана и одна из металла (титана, хрома, циркония, вольфрама). При этом образцы вращались между мишенями (рис. 1).

Чтобы снизить содержание водяного пара в вакуумной камере, титановая мишень распылялась в присутствии аргона во время ионной очистки подложек перед осаждением для получения геттерирующего эффекта, создаваемого холодной ловушкой с помощью атомов титана, которые выбрасывались из мишени, реагирующей с кислородом в камере. Затем титановая мишень использовалась для нанесения промежуточного слоя толщиной 100 нм, что улучшило адгезию покрытия.

Таблица 1

Основные параметры осаждения ТСП типа MoST

Параметр	Мишень	
	MoS ₂ (99,0 %)	Ti (99,9 %)
Мощность на мишени, кВт	5	0...5
Базовое давление, мПа	1	
Давление Ar, Па	0,5	
Температура осаждения, °С	Около 100	
Смещение подложки, В	-100	
Несбалансированный ток катушки, А	5	
Время осаждения, мин	60	

Титан применялся в качестве промежуточного слоя для повышения несущей способности и адгезии таких металлов, как вольфрам или цирконий. Далее наносился второй промежуточный слой путем распыления четырех мишеней: двух из дисульфида молибдена, одной из титана и одной из металла. Мощность потенциала титановой мишени постепенно снижалась до нуля. Этот слой состоял из 200-нанометрового смешанного металлического титана и MoS₂.

В данной работе проведены исследования ТСП_{CFUBMSIP} на основе MoS₂ и комбинированного состава Cr/MoS₂, W/MoS₂ и Zr/MoS₂. Металлическая мишень выключалась в конце процесса для получения чистого покрытия MoS₂ толщиной 50 нм.

Примерные параметры нанесения ТСП типа MoST методом CFUBMSIP можно оценить при

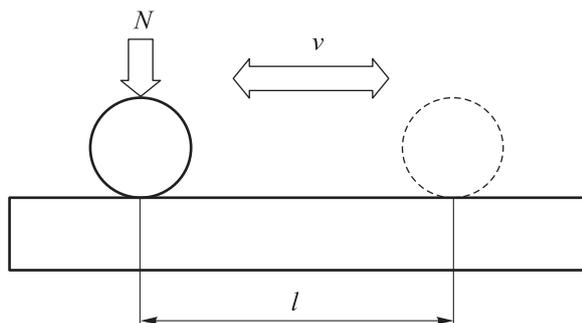


Рис. 3. Схема возвратно-поступательного движения шара по плоскости при трибологическом испытании ТСП типа MoST

анализе режимов, описанных в работе [17], где использована аналогичная схема (рис. 2).

Основные параметры осаждения ТСП типа MoST приведены в табл. 1.

Условия проведения и результаты трибологических испытаний ТСП. Износостойкость и антифрикционные свойства ТСП типа MoST оценивали при возвратно-поступательном движении шара, изготовленного из твердого сплава ВК6 (WC — 94 %, Co — 6 %), по плоскости (рис. 3). Контактная нагрузка $N = 100$ Н, диаметр шара $d = 5$ мм, длина дорожки $l =$

$= 2,5$ мм, скорость скольжения $v = 150$ мм/мин (в течение 1 с в каждом направлении) [13, 15]. Все трибологические испытания проводили на воздухе при температуре $20...23$ °С и относительной влажности $30...40$ %.

В работах [15, 18] приведены результаты испытаний при возвратно-поступательном изнашивании покрытий на основе MoS₂, разработанных с использованием системы замкнутого поля несбалансированного магнетрона в 1994–1996 гг.

Наибольшее число циклов испытаний ТСП типа MoST составило 10 000, твердость покрытия — 500 HV. С учетом того, что в одном направлении шар двигался 1 с, один цикл перемещения при возвратно-поступательном движении осуществлялся за 2 с. Следовательно, наибольший ресурс ТСП типа MoST $\tau_{\text{MoST}} = 10\,000 \cdot 2 = 20\,000$ с = 333,3 мин.

Испытания проводили на тестере царапин и износа Teer ST-2200 [13] на воздухе при температуре 20 °С и относительной влажности 41 %, т. е. в нормальных атмосферных условиях (НАУ), под водой и в чистом синтетическом моторном масле Castrol (далее масло). Результаты реверсивных испытаний пары трения шар — плоскость (далее пара трения)

Таблица 2

Результаты реверсивных испытаний пары трения с ТСП разного состава, нанесенных методом CFUBMSIP

ТСП	Среда испытаний	Трибологические параметры			
		Коэффициент трения $f_{\text{тр}}$	Износ пары трения I , м ³ /м · Н	Ширина дорожки трения b , мкм	Число циклов испытаний W
MoS ₂	НАУ	0,020	$8,00 \cdot 10^{-16}$	276	880
	Вода	0,018	$1,99 \cdot 10^{-14}$	250	32
	Масло	0,080	$2,25 \cdot 10^{-15}$	220	150
MoS ₂ + Ti	НАУ	0,038	$4,13 \cdot 10^{-17}$	214	10 000
	Вода	0,020	$1,93 \cdot 10^{-16}$	272	3600
	Масло	0,030...0,080	$5,71 \cdot 10^{-17}$	234	10 000
MoS ₂ + Zr	НАУ	0,039	$1,80 \cdot 10^{-17}$	168	10 000
	Вода	0,022	$1,29 \cdot 10^{-16}$	276	6200
	Масло	0,030...0,070	$5,96 \cdot 10^{-17}$	206	10 000
MoS ₂ + Cr	НАУ	0,029	$4,61 \cdot 10^{-17}$	230	10 000
	Вода	0,021	$3,59 \cdot 10^{-16}$	240	2100
	Масло	0,070	$1,22 \cdot 10^{-16}$	390	10 000
MoS ₂ + W	НАУ	0,028	$3,17 \cdot 10^{-17}$	224	10 000
	Вода	0,022	$1,77 \cdot 10^{-16}$	250	3600
	Масло	0,020...0,040	$4,39 \cdot 10^{-16}$	172	10 000

с ТСП разного состава, нанесенных методом CFUBMSIP, приведены в табл. 2.

Анализ результатов. Значения антифрикционных характеристик — коэффициента трения — пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} разного состава, функционирующей в НАУ, воде и масле (см. табл. 2), приведены на рис. 4, а. Как видно из рисунка, для всех исследованных ТСП_{CFUBMSIP} в НАУ коэффициент трения $f_{тр} = 0,020...0,040$, в воде $f_{тр} = 0,020...0,025$, в масле $f_{тр} = 0,030...0,080$.

Значения относительного износа $I_{отн} = \lg(I \cdot 10^{17})$ пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} разного

состава, функционирующей в НАУ, воде и масле, приведены на рис. 4, б. Анализ полученных данных показывает, что износостойкость ТСП на основе чистого дисульфида молибдена существенно меньше, чем у ТСП комбинированного состава.

Значения ширины дорожки трения шара b пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} разного состава, функционирующей в НАУ, воде и масле, приведены на рис. 4, в. Анализ рисунка позволяет заключить, о несущественных изменениях истирающей способности рассматриваемых ТСП ($\Delta b = 200...400$ мкм) для различных сред функционирования.

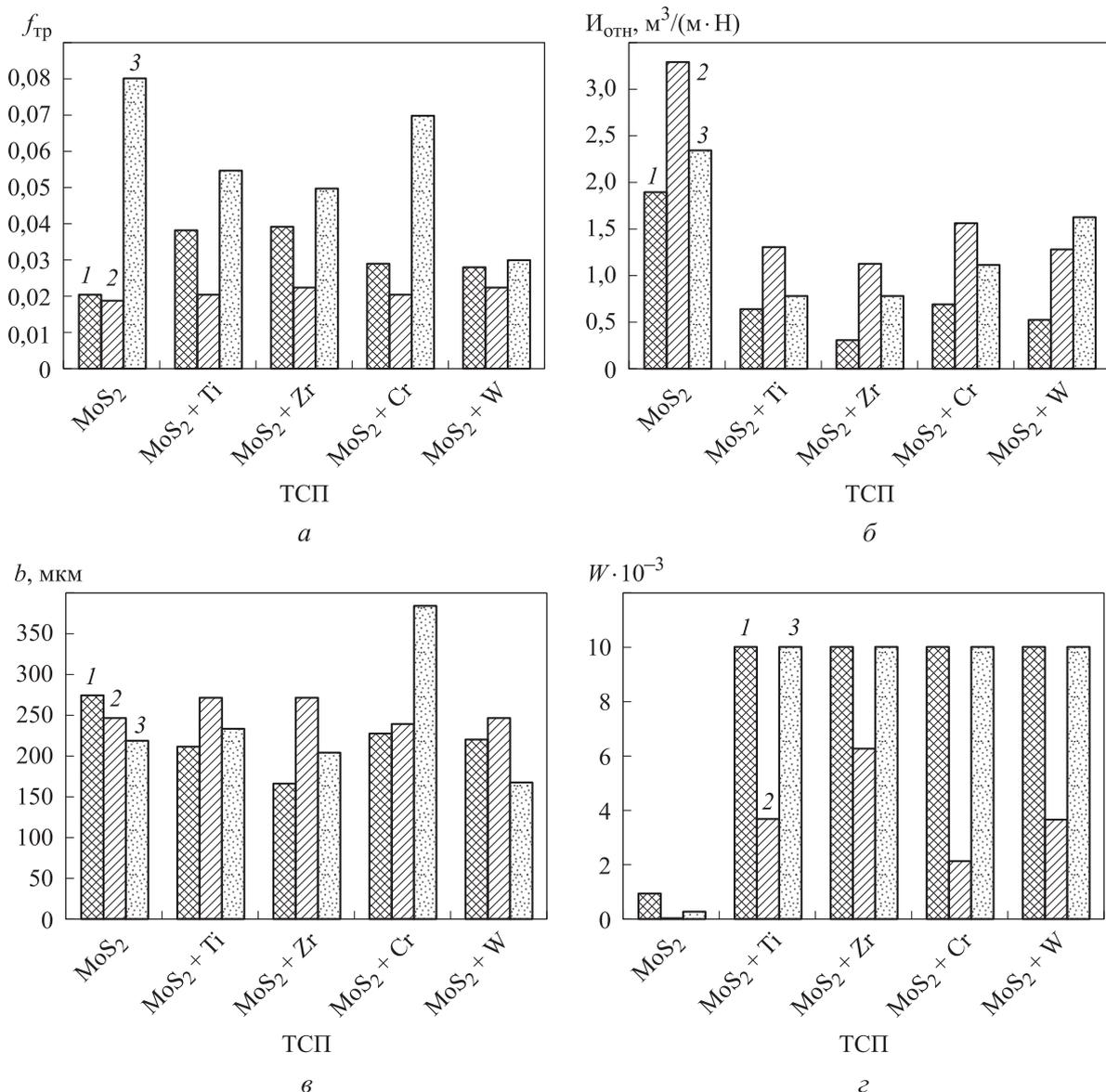


Рис. 4. Значения коэффициента трения $f_{тр}$ (а), относительного износа $I_{отн}$ (б), ширины дорожки трения шара b (в) и числа циклов испытаний W (г) пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} разного состава, функционирующей в НАУ (1), воде (2) и масле (3)

Значения износостойкости — числа циклов испытаний W — пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} разного состава, функционирующей в НАУ, воде и масле, приведены на рис. 4, *г*.

Для оценки степени снижения ресурса пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} в воде относительно такового для ТСП_{CFUBMSIP} в НАУ введен коэффициент снижения ресурса

$$K_{\text{сн.р}} = \frac{W_{\text{возд}}}{W_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{возд}}$ и $W_{\text{в}}$ — число циклов испытаний пары трения с ТСП_{CFUBMSIP} в НАУ и воде.

С помощью формулы (1) получены следующие значения коэффициента снижения ресурса для ТСП_{CFUBMSIP} разного состава:

MoS ₂	27,50
MoS ₂ + Ti	2,78
MoS ₂ + Zr	1,61
MoS ₂ + Cr	4,76
MoS ₂ + W	2,78

Анализ рассчитанных значений коэффициента $K_{\text{сн.р}}$ и данных, приведенных на рис. 4, *в*, показывает следующее:

• ТСП_{CFUBMSIP} на основе чистого дисульфида молибдена в исследованных условиях практически неработоспособно;

• в НАУ и масле ТСП_{CFUBMSIP} имеют предельную для данных условий износостойкость;

• в воде наибольшее число циклов ($W = 6200$) наблюдается у ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Zr; ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Ti и MoS₂ + W выдерживают одинаковое число циклов $W = 3600$;

• среднее значение коэффициента снижения ресурса для всех ТСП_{CFUBMSIP} комбинированного типа составило 2,98.

Расчетная оценка триботехнических характеристик ТСП_{CFUBMSIP} для условий скользящего контакта. Решение поставленной задачи включало в себя три этапа.

1. Оценка контактной температуры трения реверсивно работающего сопряжения с ТСП_{CFUBMSIP}. На первом этапе использованы термокорреляционные зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ [2], где p — контактное давление; v — скорость скольжения. Для рассматриваемого случая (см. рис. 3) скорость скольжения $v = 150$ мм/мин =

Таблица 3

Расчетные значения контактного давления для реверсивно работающего сопряжения с ТСП_{CFUBMSIP}

ТСП _{CFUBMSIP}	Контактное давление p_{CFUBMSIP} , МПа		
	в НАУ	в воде	в масле
MoS ₂	1672	2038	2632
MoS ₂ + Ti	2782	1722	1697
MoS ₂ + Zr	4513	1672	3002
MoS ₂ + Cr	2408	2212	838
MoS ₂ + W	2539	2038	1722

Таблица 4

Зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ для различных схем трения, типов ТСП и диапазонов варьирования параметров в НАУ

Тип ТСП на основе MoS ₂	Схема трения	Диапазоны варьирования параметров		Зависимость $T_{\text{тр}} = f(p, v)$, °С
		N, H (p , МПа)	v , м/с	
ВНИИ НП-212	Роликовая (модернизированная машина трения типа РП)	236...1337 (23,1...133,7)	0,096...1,224	$T_{\text{тр}} = 36,49 + 132,23v + 0,535p + 0,234pv - 47,94v^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} p^2$
ВНИИ НП-212	Роликовая (машина трения типа СМТ)	210...1790 (12,2...103,5)	1,472...3,728	$T_{\text{тр}} = 119,35 + 10,26v + 0,065p + 0,335pv$
Molykote 7409	Торцевая (стенд шайба — диск)	755...9045 (5,60...67,2)	0,110...0,250	$T_{\text{тр}} = 67,27 - 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,011p^2$ (2)

$= 2,5 \text{ мм/с} = 0,0025 \text{ м/с}$. Контактное давление оценивали с учетом контактной нагрузки $N = 100 \text{ Н}$ и площади пятна износа на шарике S , рассчитываемой исходя из ширины площадки износа b (см. табл. 2).

Расчетные значения контактного давления для реверсивно работающего сопряжения с ТСП_{CFUBMSIP}, приведены в табл. 3.

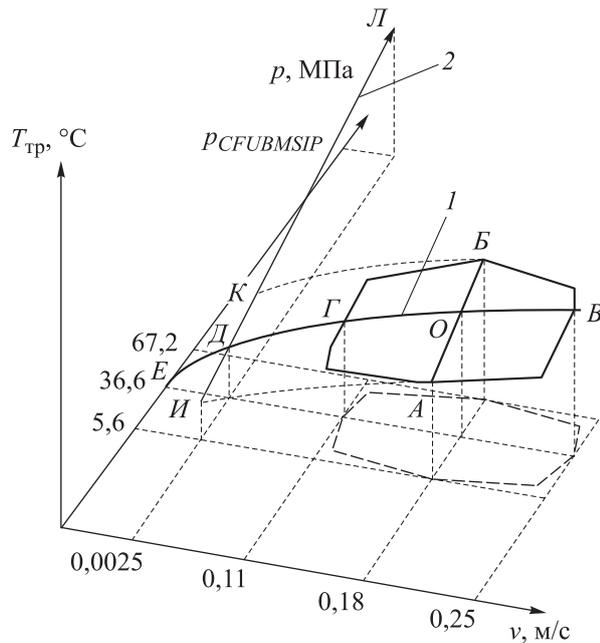


Рис. 5. Схемы первой (1) и второй (2) корректировок температуры трения $T_{\text{тр}}$ для условий реверсивных испытаний трибосопряжения с ТСП_{CFUBMSIP}

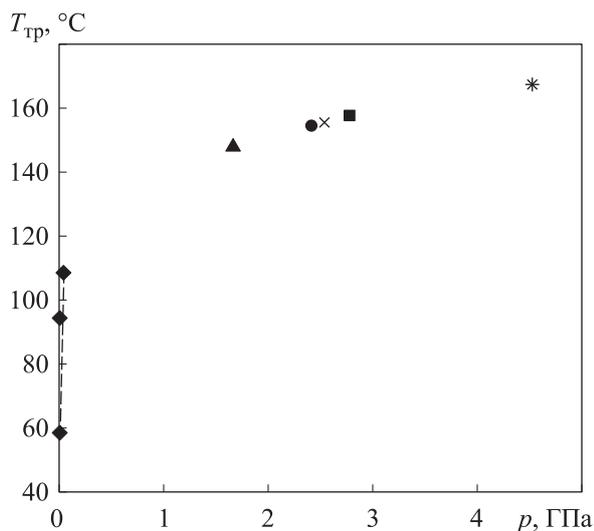


Рис. 6. Результаты расчета поверхностной температуры трения $T_{\text{тр}}$ для реверсивных трибоиспытаний ТСП_{CFUBMSIP} разного состава в НАУ (кривая ИДКЛ, см. рис. 5):
 ▲ — MoS₂; ■ — MoS₂ + Ti; * — MoS₂ + Zr;
 ◆ — кривая AB

Для расчета контактной температуры трения использованы термокорреляционные зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$, приведенные в работе [2]. Зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ для различных схем трения, типов ТСП и диапазонов варьирования параметров в НАУ приведены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает, что самыми близкими к нагрузочно-скоростным параметрам исследуемых ТСП оказались диапазоны зависимости (2). Однако выход контактного давления p и скорости скольжения v пар трения с ТСП за диапазоны указанной зависимости требует корректировки с пересчетом значений $T_{\text{тр}}$. Пересчет проведен согласно схемам первой и второй корректировок $T_{\text{тр}}$ для условий реверсивных испытаний трибосопряжения с ТСП_{CFUBMSIP}, приведенным на рис. 5.

При первой корректировке пересчет выполнен для основного уровня контактного давления $p = 36,6 \text{ МПа}$. Ординаты точек кривой ВОГ рассчитаны путем преобразования термокорреляционной зависимости (2), которая для указанного уровня контактного давления приобретает вид

$$T_{\text{тр}} = 69,4 + 136v.$$

Точка Д (см. рис. 5) соответствовала значению скорости скольжения, принятому при исследовании ТСП_{CFUBMSIP} (см. табл. 2), а ордината точки Е — температуре фрикционного контакта при нулевой скорости скольжения, которая была принята равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

При учете ординат точек В, О, Г, Д и Е с помощью программы MATLAB получена экспоненциальная зависимость, описывающая искомую кривую ВЕ,

$$T_{\text{тр}} = 72,08 e^{1,449v} - 52,08 e^{-1198v}. \quad (3)$$

Рассчитанная по уравнению (3) поверхностная температура трения точки Е для искомой скорости $v = 0,0025 \text{ м/с}$ составила $69,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

При второй корректировке вначале получили уравнение кривой АВ для основного уровня скорости скольжения $v = 0,18 \text{ м/с}$:

$$T_{\text{тр}} = 48,48 + 1,62p - 0,011 p^2. \quad (4)$$

После расчета разницы температур $T_{\text{тр}}$ точек О и Д уравнение (4) преобразовали в уравнение кривой ИК, а затем расширили его до искомых значений давления p_{CFUBMSIP} (см. табл. 3). Результаты расчета поверхностной температуры трения $T_{\text{тр}}$ для реверсивных три-

Таблица 5

Расчетные значения поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для различных условий реверсивных трибоиспытаний ТСП_{CFUBMSIP}

ТСП _{CFUBMSIP}	Температура $T_{тр}$, °C		
	в НАУ	в воде	в масле
MoS ₂	148	152	156
MoS ₂ + Ti	158	148	148
MoS ₂ + Zr	168	148	159
MoS ₂ + Cr	155	153	134
MoS ₂ + W	156	152	148

Таблица 6

Значения коэффициента снижения ресурса K пар трения с ТСП_{СН} при переходе от скользящего движения к реверсивному

Тип	ТСП _{СН}		K
	Состав		
Мolykote 3400А	MoS ₂ (12 %) + эпоксидная смола		2,09 [19]
Мolykote 3400А (без Pb)	MoS ₂ (12 %) + эпоксидная смола		0,99...2,07 [19]
ВНИИ НП 230	MoS ₂ + эпоксидное связующее		0,94 [20]
ВНИИ НП 212	MoS ₂ + мочевиноформальдегидная смола		2,26 [20]
ВНИИ НП 250	MoS ₂ + кремнийорганическая смола		1,85 [20]
ВНИИ НП 229	MoS ₂ + силикат натрия		3,78 [20]
Среднее значение			2,13

боиспытаний ТСП_{CFUBMSIP} разного состава в НАУ приведены на рис. 6.

Расчетные значения поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для всех условий реверсивных трибоиспытаний ТСП_{CFUBMSIP} приведены в табл. 5.

2. Сравнительная оценка ресурса пары с ТСП_{CFUBMSIP}, пересчитанного для условий скользящего контакта, с ресурсом отечественного ТСП_{СН} для НАУ. Для такой оценки необходимо провести пересчет с использованием коэффициента снижения ресурса пары трения с ТСП_{СН} при ее переходе от скользящего движения к реверсивному по формуле [19, 20]

$$\tau_{ск} = \tau_{рев} K,$$

где $\tau_{ск}$ и $\tau_{рев}$ — ресурс пары трения с ТСП при скользящем и реверсивном движении.

Значения коэффициента снижения ресурса K пар трения с ТСП_{СН} при переходе от скользящего движения к реверсивному, полученные в работах [19, 20], приведены в табл. 6.

При среднем значении коэффициента $K = 2,13$ получены следующие значения ресурса пары трения с покрытиями, нанесенными по технологии CFUBMSIP:

- для MoS₂

$$\tau_{ск} = (880 \cdot 2) \cdot 2,13 = 62,5 \text{ мин} = 1,04 \text{ ч};$$

- для комбинированного состава MoS₂/металл

$$\tau_{ск} = (10\,000 \cdot 2) \cdot 2,13 = 710 \text{ мин} = 11,8 \text{ ч}.$$

В целях сравнения расчетных значений ресурса ТСП_{CFUBMSIP} с ресурсом ТСП_{СН} построена зависимость $\tau = f(T_{тр})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 [19], приведенная на рис. 7.

Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает, что при средней поверхностной температуре трения $T_{тр} = 157$ °C ресурс ТСП_{CFUBMSIP} комбинированного состава MoS₂/металл на 42,1 % больше, чем у ТСП_{СН} ВНИИ НП 212.

3. Сравнительная оценка коэффициента трения пар с ТСП_{CFUBMSIP} комбинированного состава, пересчитанная для условий сколь-

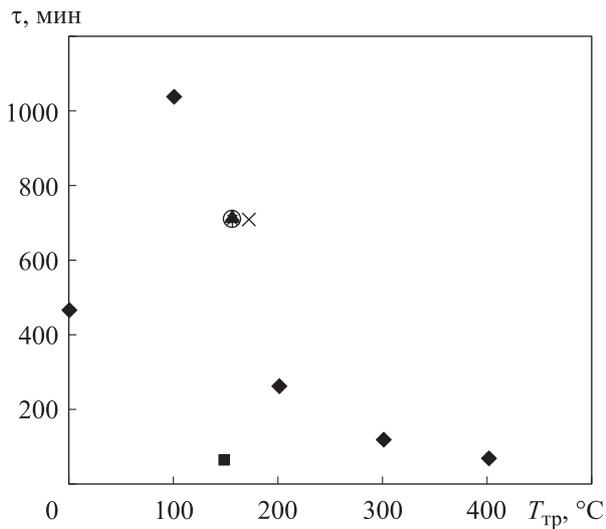


Рис. 7. Расчетные значения ресурса τ ТСП_{CFUBMSIP} при средней поверхностной температуре трения $T_{тр} = 157$ °С и зависимость $\tau = f(T_{тр})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в НАУ:
 ◆ — ТСП_{СН} ВНИИ НП 212; ■ — ТСП_{CFUBMSIP} на основе MoS₂; ▲ — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Ti; × — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Zr; * — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Cr; ○ — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + W

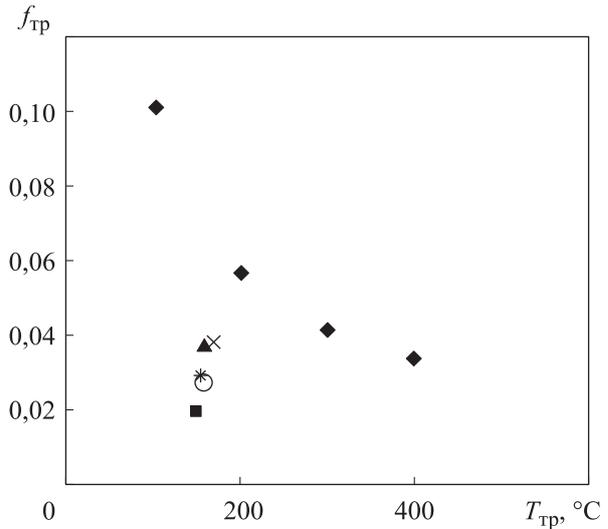


Рис. 8. Расчетные значения коэффициента трения $f_{тр}$ ТСП_{CFUBMSIP} при средней поверхностной температуре трения $T_{тр} = 157$ °С и зависимость $f_{тр} = f(T_{тр})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в НАУ:
 ◆ — ТСП_{СН} ВНИИ НП 212; ■ — ТСП_{CFUBMSIP} на основе MoS₂; ▲ — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Ti; × — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Zr; * — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Cr; ○ — ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + W

злящего контакта, в сравнении с антифрикционными характеристиками отечественного ТСП_{СН} для НАУ [21]. Расчетные значения коэффициента трения $f_{тр}$ ТСП_{CFUBMSIP} разного состава при средней поверхностной температуре трения $T_{тр} = 157$ °С и зависимость $f_{тр} = f(T_{тр})$ для ТСП_{СН} ВНИИ НП 212 в НАУ приведены на рис. 8.

Анализ результатов исследований, приведенных на рис. 8, показывает, что коэффициент трения ТСП_{CFUBMSIP} в среднем в 2 раза меньше, чем у ТСП_{СН} ВНИИ НП 212. Это можно объяснить следующими причинами. Созданные в условиях вакуума ТСП_{CFUBMSIP} толщиной около 1 мкм дают возможность создать покрытия из частиц MoS₂, расположенных параллельно поверхности трения, что подтверждается низким коэффициентом трения.

В то время как нанесенные в НАУ ТСП_{СН} с оптимальной толщиной 20 ± 5 мкм [22] и $7,62 \pm \pm 12,7$ мкм [23] позволяют получить покрытия, в которых частицы MoS₂ расположены хаотично. И лишь в результате последующей приработки в режимах, обеспечивающих температуру $T_{тр} \geq 100$ °С, образуется смазочная пленка толщиной около 1 мкм, состоящая из строго ориентированных вдоль поверхности трения частиц MoS₂, благодаря чему коэффициент трения $f_{тр} = 0,03 \dots 0,06$.

Выводы

1. Разработана и реализована методика сравнительной оценки результатов трибологических испытаний ТСП для условий реверсивного и скользящего контактов.

2. В результате сравнительной оценки триботехнических характеристик фрикционного сопряжения с ТСП_{СН} на основе MoS₂ типа ВНИИ НП 212 и ТСП_{CFUBMSIP} комбинированного состава MoS₂ + Ti, MoS₂ + Zr, MoS₂ + Cr, MoS₂ + W в НАУ с режимами трения, соответствующими температуре $T_{тр} = 157$ °С, установлено:

- ресурс ТСП_{CFUBMSIP} на 42,1 % больше, чем у ТСП_{СН} ВНИИ НП 212;

- коэффициент трения ТСП_{CFUBMSIP} в среднем в 2 раза меньше, чем у ТСП_{СН} ВНИИ НП 212.

3. Анализ результатов реверсивных трибоиспытаний ТСП_{CFUBMSIP} выявил следующее:

- в НАУ и масле ТСП_{CFUBMSIP} комбинированного состава MoS₂ + Ti, MoS₂ + Zr, MoS₂ + Cr, MoS₂ + W имеют предельную для данных условий износостойкость;

- в воде наибольшее число циклов ($W = 6200$) наблюдается у ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Zr; ТСП_{CFUBMSIP} состава MoS₂ + Ti и

MoS₂ + W выдерживают одинаковое число циклов $W = 3600$;

- среднее значение коэффициента снижения ресурса при переходе от НАУ к воде составило 2,98;

- ТСП_{CFUBMSIP} на основе чистого MoS₂ в НАУ, воде и масле практически неработоспособно;
- в НАУ и воде коэффициент трения ТСП_{CFUBMSIP} составил 0,02...0,04, в масле — 0,03...0,08.

Литература

- [1] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 142–144, pp. 67–77, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2
- [2] Хопин П.Н. Оценка долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями различных составов отечественного и зарубежного производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 1, с. 84–93, doi: 10.18698/0536-1044-2018-1-84-93
- [3] Брейтуэйт Е.Р. *Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия*. Москва, Химия, 1967. 320 с.
- [4] Krick B.A., Sawyer W.G. Space Tribometers: Design for Exposed Experiments on Orbit. *Tribol Letters*, 2011, vol. 41, pp. 303–311, doi: 10.1007/s11249-010-9689-y
- [5] Wang H., Xu B., Liu J. *Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication*. Science Press Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. 304 p.
- [6] Miyoshi K. *Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces*. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, Marcel Dekker Inc., New York, 2001. 400 p.
- [7] Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, pp. 741–748, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.008>
- [8] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, ЭкоПресс, 2010. 604 с.
- [9] Поздняков В.В., Буяновский И.А. *Эффективные методы уменьшения трения (твердые смазки)*. Москва, ЦНИИПИ, 1977. 52 с.
- [10] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т., 2007. 54 с.
- [11] Teer D.G., Hampshire J., Fox V., Bellido-Gonzalez V. The tribological properties of MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 94–95, pp. 572–577.
- [12] Teer D.G., Hampshire J.H., Bellido V. *Improvements in and relating to methods for improving the sputter disposition of metal-sulphur coatings, e.g. molybdenum disulphide coatings and to improved coatings*. Patent EU 96924987.9. 1996.
- [13] Renevier N.M., Fox V.C., Teer D.G., Hampshire J. Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, pp. 24–37, doi: 10.1016/S0257-8972(00)00538-7
- [14] Teer D.G. *Magnetron Sputter Ion Plating*. UK Patent GB 2258343B, 1990.
- [15] Bellido-Gonzalez V., Jones A.H.S., Hampshire J., Allen T.J., Witts J., Teer D.G., Ma K.J., Upton D. Tribological behaviour of high performance MoS₂ coatings produced by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 97, pp. 687–693, doi: 10.1016/S0257-8972(97)00546-X
- [16] Teer D.G., Bellido-Gonzalez V., Hampshire J.H. *Improvements in and relating to methods for improving the sputter deposition of metal-sulphur coatings, e.g. MoS₂ coatings, and to improved coatings*. Patent no. 9615137.8 UK, 1996.
- [17] Zhou Hui, Zheng Jun, Wen Qing-Ping, Wan Zhi-hua, Sang Rui-Peng. The effect of Ti content on the structural and mechanical properties of MoS₂-Ti composite coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering system. *Physics Procedia*, 2011, vol. 18, pp. 234–239, doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.087
- [18] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2

- [19] Хопин П.Н., Трунова Е.А. Сравнительная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями зарубежного производства при скользящем и реверсивном движениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 10, с. 47–55, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-47-55
- [20] 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.
- [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] Сентюрихина Л.Н., Рубцова З.С. *Нанесение твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, на поверхности трения*. Москва, Химия, 1967. 12 с.
- [23] Gonzalez D. *Process Specification for Dry-Film Lubricant Application*. PRC-8001 Rev. F. NASA, Johnson Space Center, Houston, Texas, 2019. 13 p.

References

- [1] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 142–144, pp. 67–77, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2
- [2] Khopin P.N. An Assessment of the Durability of Friction Couples with Solid Lubricant Coatings of Various Compositions Produced by Domestic and Foreign Manufacturers. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 1, pp. 84–93 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-1-84-93
- [3] Breytueyt E.R. *Tverdye smazochnyye materialy i antifriktsionnyye pokrytiya* [Solid lubricants and anti-friction coatings]. Moscow, Khimiya publ., 1967. 320 p.
- [4] Krick B.A., Sawyer W.G. Space Tribometers: Design for Exposed Experiments on Orbit. *Tribol Letters*, 2011, vol. 41, pp. 303–311, doi: 10.1007/s11249-010-9689-y
- [5] Wang H., Xu B., Liu J. *Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication*. Science Press Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. 304 p.
- [6] Miyoshi K. *Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces*. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, Marcel Dekker Inc., New York, 2001. 400 p.
- [7] Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, pp. 741–748, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.008>
- [8] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (treniye, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow, EkoPress publ., 2010. 604 p.
- [9] Pozdnyakov V.V., Buyanovskiy I.A. *Effektivnyye metody umen'sheniya treniya (tverdye smazki)* [Effective methods for reducing friction (solid lubricants)]. Moscow, TSNIPI publ., 1977. 52 p.
- [10] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruksionnyye i smazochnyye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Construction and lubricants of space mechanisms]. Sankt-Petersburg, VOENMEH publ., 2007. 54 p.
- [11] Teer D.G., Hampshire J., Fox V., Bellido-Gonzalez V. The tribological properties of MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 94–95, pp. 572–577.
- [12] 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*. Patent EU 96924987.9. 1996.
- [13] Renevier N.M., Fox V.C., Teer D.G., Hampshire J. Coating characteristics and tribological properties of sputter-deposited MoS₂/metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, pp. 24–37, doi: 10.1016/S0257-8972(00)00538-7
- [14] Teer D.G. *Magnetron Sputter Ion Plating*. UK Patent GB 2258343B, 1990.
- [15] Bellido-Gonzalez V., Jones A.H.S., Hampshire J., Allen T.J., Witts J., Teer D.G., Ma K.J., Upton D. Tribological behaviour of high performance MoS₂ coatings produced by magne-

- tron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 97, pp. 687–693, doi: 10.1016/S0257-8972(97)00546-X
- [16] Teer D.G., Bellido-Gonzalez V., Hampshire J.H. *Improvements in and relating to methods for improving the sputter deposition of metal-sulphur coatings, e.g. MoS₂ coatings, and to improved coatings*. Patent no. 9615137.8 UK, 1996.
- [17] Zhou Hui, Zheng Jun, Wen Qing-Ping, Wan Zhi-hua, Sang Rui-Peng. The effect of Ti content on the structural and mechanical properties of MoS₂-Ti composite coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering system. *Physics Procedia*, 2011, vol. 18, pp. 234–239, doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.087
- [18] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01108-2
- [19] Khopin P.N., Trunova E.A. A Comparative Assessment of Efficiency of Foreign-Made Friction Pairs with Solid Lubricant Coating when in Sliding and Reverse Motion. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 10, pp. 47–55 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-47-55
- [20] Khopin P.N., Kozlova O.V., Gorbach L.E. Durability evaluation for friction pairs with solid lubrication coatings under reverse motion. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 505–511, doi: 10.3103/S1068366618060053
- [21] Khopin P.N. Assessment of antifriction characteristics of friction pairs with solid-lubricating coatings under various operating conditions. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, no. 5, pp. 374–379, doi: 10.3103/S1068366615050074
- [22] Sentyurikhina L.N., Rubtsova Z.S. *Naneseniye tverdykh smazochnykh pokrytiy, soderzhashchikh disulfid molibdena, na poverkhnosti treniya* [Applying a solid lubricant coating containing molybdenum disulfide on the surface of the friction]. Moscow, Khimiya publ., 1967. 12 p.
- [23] Gonzalez D. *Process Specification for Dry-Film Lubricant Application*. PRC-8001 Rev. F. NASA, Johnson Space Center, Houston, Texas, 2019. 13 p.

Статья поступила в редакцию 15.09.2020

Информация об авторах

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).

СИЛЬЧЕНКО Ольга Борисовна — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов». МАИ (125993, Москва, Российская Федерация, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: silyaolya@yandex.ru).

Information about the authors

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

SILCHENKO Olga Borisovna — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Manufacturing and Operation of Aircraft Engines. Moscow Aviation Institute (125993, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: silyaolya@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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: 10.18698/0536-1044-2021-1-54-65

Please cite this article in English as:

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. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 1, pp. 54–65, doi: 10.18698/0536-1044-2021-1-54-65