

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.891:519.28

doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104

## Эффективность функционирования трибосопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе $\text{MoS}_2$ , нанесенными магнетронным и суспензионным методами

П.Н. Хопин

МАИ

## The Efficiency of Tribocoupling with $\text{MoS}_2$ -Based Solid Lubricant Coatings Using Magnetron and Suspension Sputtering

P.N. Khopin

Moscow Aviation Institute

Анализ исследований, проведенных в условиях вакуума, выявил, что твердосмазочное покрытие на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенное магнетронным методом на титановую основу, практически неработоспособно. Установлено, что удовлетворительную работоспособность для рассматриваемых сопряжений обеспечивает предварительная обработка основы — гальваническое хромирование и химическое никелирование. Показано, что ресурс пары с твердосмазочными покрытиями, нанесенными магнетронным методом на керамическую основу, больше, чем у покрытий, напыленных на металлическую основу. Однако, начиная с середины ресурса, появляются отдельные временные «всплески» коэффициента трения, стабилизирующиеся впоследствии. Ресурс работы покрытий, нанесенных магнетронным методом, оказался в 2,51 раза меньше, чем у пары с покрытиями типа ВНИИ НП 212, полученными методом суспензионного нанесения, и в 3,65 раза ниже, чем у аналогов зарубежного производства. Коэффициент трения для рассматриваемых сопряжений в условиях вакуума изменяется от 0,02 до 0,07.

**Ключевые слова:** твердосмазочные покрытия, триботехнические показатели, магнетронное и суспензионное нанесение, высокий вакуум

An analysis of studies conducted under vacuum conditions revealed that  $\text{MoS}_2$ -based solid lubricant coatings applied to a titanium base using magnetron sputtering was virtually unusable. It was established that satisfactory working capacity of the considered couplings could be achieved by preliminary treatment of the base, that is by galvanic chrome plating and nickel plating. It was shown that life of a coupling with solid lubricant coatings sputtered using the magnetron method on a ceramic base was higher than those sputtered on a metal base. However, starting from the middle of operational life, temporary “surges”

in the coefficient of friction occurred and subsequently stabilized. The life of coatings sputtered using the magnetron method was 2.51 times lower than that of a coupling with coatings of the BNII NP 212 type obtained using the suspension method, and 3.65 times lower than that of similar types by foreign manufacturers. The coefficient of friction for the considered couplings under vacuum conditions varied from 0.02 to 0.07.

**Keywords:** solid lubricant coatings, tribotechnical indicators, magnetron and suspension sputtering, high vacuum

К числу перспективных методов нанесения твердосмазочных покрытий (ТСП) на узлы трения, функционирующие в экстремальных условиях высокого вакуума, относится магнетронное нанесение (МН) ТСП, в частности, наиболее распространенного твердосмазочного наполнителя  $\text{MoS}_2$  [1–7].

Цель работы — оценка триботехнических показателей сопряжений с ТСП, нанесенными методом МН, и их сравнение с ТСП, получаемыми методом суспензионного нанесения (СН).

Обзор научной литературы выявил результаты триботехнических высоковакуумных испытаний пар трения скольжения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенными методом МН [1].

**Условия проведения испытаний.** 1. Установка, разработанная Е.В. Робертсом (далее установка Робертса) [1] для проведения триботехнических испытаний в вакууме по схеме трения диск — тройной индентор (рис. 1).

Диск с покрытием  $\text{MoS}_2$  вращался относительно трех сферических инденторов радиусом  $R_{\text{сф}} = 3,67$  мм. Нагрузка на каждый из инденторов составляла 16,7 Н, общая контактная нагрузка  $N = 50$  Н. Частота вращения диска  $n = 400$  мин<sup>-1</sup>, что эквивалентно скорости скольжения  $v = 1,2$  м/с. Откачные средства на основе ионного и турбомолекулярных насосов обеспечивали вакуум 0,0667 мПа.

Индентор и диск были выполнены из подшипниковой стали 52100, титанового сплава

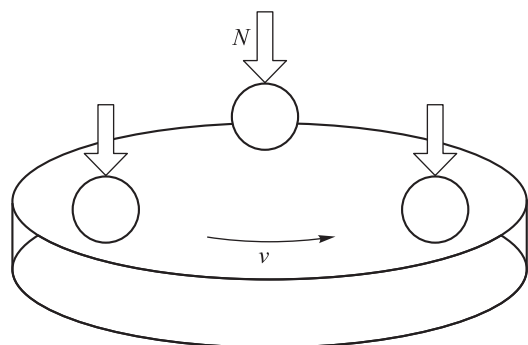


Рис. 1. Схема трения диск — тройной индентор установки Робертса [1]

IMI 318 (содержащего 6 % алюминия и 4 % ванадия) и нитрида кремния. Для изготовления образцов диска и индентора из титанового сплава использованы материалы компании IMI Titanium Ltd., для дисков из нитрида кремния, полученных методом горячего прессования, — компании MATROC Advanced Materials Engineering Ltd., для инденторов из нитрида кремния, выполненных горячим изостатическим прессованием, — компании Spheric Engineering.

Металлические диски полировались до шероховатости поверхности  $Ra = 0,04; 0,12; 0,25$  и  $0,40$  мкм. Образцы из нитрида кремния с нужной шероховатостью были поставлены изготовителем. Механическая обработка образцов из титанового сплава проведена с помощью алмазного притира.

После очистки растворителем диски покрывались дисульфидом молибдена толщиной 1 мкм с помощью метода МН [8] при RF-мощности 0,9 кВт. В таких условиях скорость осаждения  $\text{MoS}_2$  составляла приблизительно  $650 \text{ \AA} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Чтобы удалить все оставшиеся поверхностные загрязняющие элементы с дисков, каждый из них до нанесения покрытия подвергался ионной очистке в течение 15 мин при RF-напряжении 100 Вт. Инденторы оставались непокрытыми.

2. Машина трения СМТ-1. Схема трения ролик — ролик. ТСП различного типа наносилось на вращающийся ролик, выполненный из титанового сплава VT20 и стали ШХ15. Контртело изготавливалось из подшипниковой стали ШХ15 и ХВГ (HRC > 60).

3. Стенд для изучения трения и износа в вакууме ( $p_{\text{в}} = 4$  мПа) с нагрузочно-измерительным механизмом, работающим по схеме ролик — ролик [9, 10]. ТСП различного типа наносилось на вращающийся ролик, сделанный из стали ШХ 15. Контртело изготавливалось из подшипниковой стали ШХ15 и ХВГ (HRC > 60).

4. Установка УТИ-1 для проведения испытаний на трение в условиях вакуума ( $p_{\text{в}} = 0,0667$  мПа). Схема трения диск — сфера, радиус сферы индентора  $R_{\text{сф}} = 4,5$  мм, нагрузка

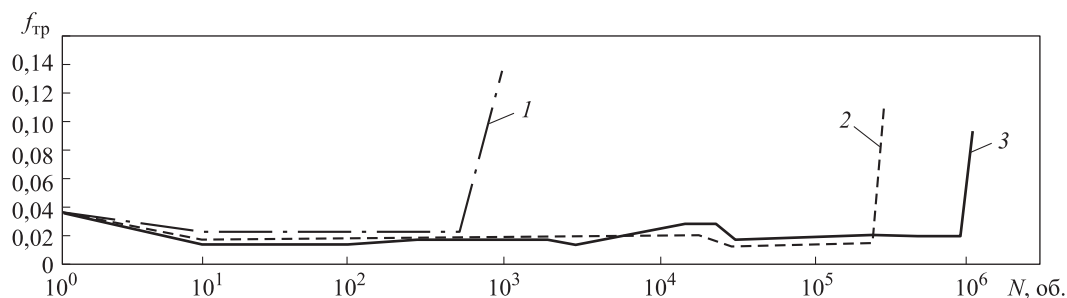


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения скольжения  $f_{тр}$  от числа циклов до разрушения  $N_p$  трибосопряжений с ТСП, нанесенными методом МН, в условиях высокого вакуума ( $p_v = 0,0667$  мПа) для различных материалов основы:

1 — титановый сплав IMI 318; 2 — подшипниковая сталь 52100; 3 — керамика на основе нитрида кремния

$N = 49$  Н, скорость скольжения  $v = 0,8$  м/с, материал диска и индентора — сталь 45.

**Результаты испытаний. Работоспособность ТСП, нанесенного методом МН на титановую основу.** На рис. 2 показаны зависимости коэффициента трения скольжения  $f_{тр}$  от числа оборотов (циклов) до разрушения  $N_p$  трибосопряжений с ТСП, нанесенными методом МН, в условиях высокого вакуума ( $p_v = 0,0667$  мПа) для трех материалов основы: титанового сплава IMI 318, подшипниковой стали 52100 и керамики на основе нитрида кремния.

Анализ приведенных на рис. 2 [1] данных показывает, что трибосопряжение из титанового сплава IMI 318 с ТСП на основе  $MoS_2$ , нанесенным методом МН, практически неработоспособно (число циклов до разрушения  $N_p < 1000$  об.). Это соответствует результатам, полученным автором данной работы для пары трения ВТ20 — ШХ15 с ТСП, нанесенными методом СН на титановую основу, при испытании на машине трения СМТ-1 в условиях нормальной атмосферы под

нагрузкой  $N = 980$  Н со скоростью скольжения  $v = 0,5$  м/с (табл. 1, рис. 3).

Анализ результатов исследования показал, что без предварительной обработки основы (титанового сплава ВТ20) ТСП ЦВСП-3 оказывается неработоспособным, а ТСП ВАП-2 — малоработоспособным (его ресурс составил 13 мин). При нанесении предварительных подслоев ресурс ТСП резко повышается. Наилучшие характеристики показали подслои с гальваническим хромированием и химическим никелированием.

**Работоспособность ТСП, нанесенных методом МН на керамическую основу [1].** На рис. 2 приведены результаты исследований ТСП рассматриваемого типа, нанесенных на керамическую основу (керамику на базе нитрида кремния горячего прессования) методом МН. Анализ полученных данных показал, что максимальное число циклов до разрушения ТСП  $N_p = 10^6$  об.

В работе [1] также представлен график динамики изменения антифрикционных характе-

Таблица 1

Триботехнические показатели пары трения ВТ20 — ШХ15 с ТСП, нанесенными методом СН на титановую основу

Тип ТСП	Предварительная обработка основы	Ресурс, мин	Коэффициент трения $f_{тр}$	
			в режиме приработки	в установившемся режиме
ВАП-2	—	13,0	0,070	0,052
	Гальваническое хромирование ( $\delta = 4$ мкм)	86,0	0,120	0,048
	Электроискровое легирование (ВК6М)	19,0	0,069	0,049
ЦВСП-3	—	—	—	—
	Гальваническое хромирование ( $\delta = 4$ мкм)	160,0	0,080	0,040
	Химическое никелирование ( $\delta = 6$ мкм)	180,0	0,050	0,034
	Электроискровое легирование (ВК6М)	22,3	0,079	0,046

Примечание.  $\delta$  — толщина ТСП.

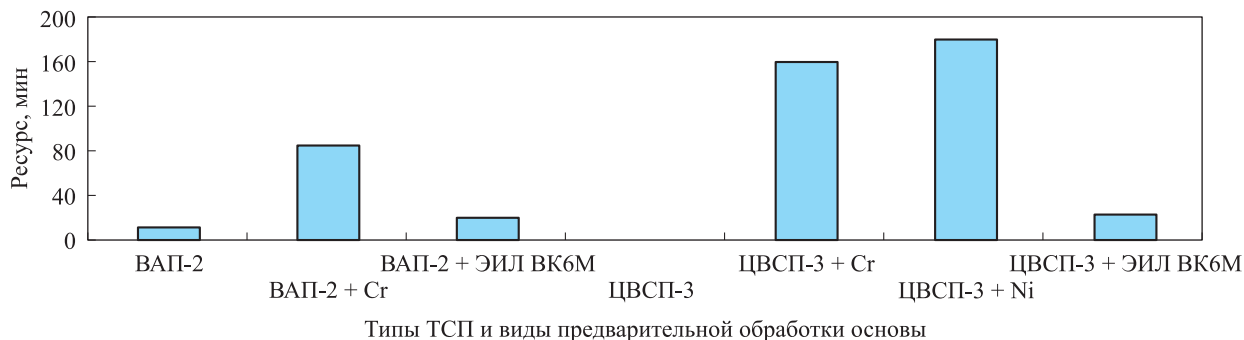


Рис. 3. Значения ресурса разных ТСП, нанесенных методом СН на титановую основу, при различных видах ее предварительной обработки:

Cr — гальваническое хромирование ( $\delta = 4$  мкм); ЭИЛ ВК6М — электроискровое легирование ВК6М; Ni — химическое никелирование ( $\delta = 6$  мкм)

ристик ТСП на керамической основе с шероховатостью  $Ra = 0,35$  мкм (рис. 4).

Анализ данных, приведенных на рис. 4, выявил следующее:

- у ТСП на керамической основе число циклов до разрушения больше, чем у других исследованных ТСП;
- при  $N_p \geq 7 \cdot 10^5$  об. наблюдаются отдельные временные «всплески» коэффициента трения, стабилизирующиеся впоследствии;
- при  $N_p < 4 \cdot 10^5$  об. коэффициент трения  $f_{тр} = 0,02$  затем он увеличивается до 0,04.

**Сравнительная оценка ресурсов трибосопряжений с ТСП, нанесенными методами МН и СН на металлическую основу.** Для оценки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  в схеме с трехшариковым индентором (см. рис. 1) с помощью зависимостей, полученных автором для схем трения с одним индентором, проведен анализ изменения теплового состояния контакта.

Количество теплоты, отводимое через нижний диск (см. рис. 1) для схемы с одним индентором, определяется выражением [11]

$$Q = k(t_n - t_b) f, \tag{1}$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи;  $t_n$  — температура поверхности контакта;  $t_b$  — температура окружающей среды;  $f$  — теплоотдающая поверхность корпуса.

Для трехинденторной схемы формулу (1) можно записать в виде

$$3Q = k(t_n - t_b) 3f. \tag{2}$$

Очевидно, что после сокращений выражения (1) и (2) будут идентичны, т. е. тепловые состояния контакта схемы с одним и тремя инденторами одинаковые.

Вследствие необходимости расчета контактного давления для схемы диск — индентор, принятой в работе [1], и отсутствия в ней данных о площади контакта, использованы результаты измерения динамики изменения диаметра пятна контакта для аналогичной схемы трения, полученные при трибовакuumных испытаниях ( $p_b = 0,0133$  МПа) применительно к ТСП типа ВНИИ НП 212, нанесенным методом СН [12].

При испытаниях на установке УТИ-1 [13] в условиях вакуума металлического индентора с радиусом сферы  $R_{сф} = 4,5$  мм, скользившего по диску с ТСП со скоростью  $v = 0,8$  м/с, диаметр пятна контакта составил 1,5 мм после наработки 300 мин.

Условия испытаний ТСП на трение и износ на установках Робертса и УТИ-1 приведены в табл. 2.

С помощью контактных характеристик установки Робертса и площади пятна контакта, полученного при испытаниях на установке УТИ-1 (диаметр контакта  $1,5$  мм<sup>2</sup>), рассчитаны контактные давления: для первой установки  $p = 9,46$  МПа, для второй  $p = 27,7$  МПа.

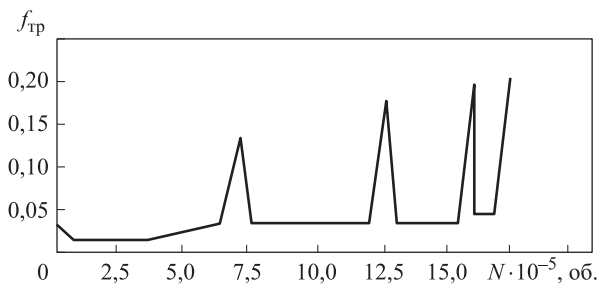


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения скольжения  $f_{тр}$  от числа оборотов до разрушения  $N_p$  пары трения с ТСП, нанесенными методом МН на керамическую основу из нитрида кремния, в условиях высокого вакуума  $p_b = 0,0667$  МПа.

Таблица 2

Условия испытаний ТСП на трение и износ на установках Робертса и УТИ-1

Параметр	Тип установки	
	Робертса	УТИ-1
Глубина вакуума $p_v$ , мПа	0,0667	0,0667
Тип ТСП	MoS <sub>2</sub> , нанесенный методом МН ( $\delta = 1$ мкм)	ВНИИ НП 212, нанесенный методом СН ( $\delta = 15$ мкм)
Схема трения	Диск — тройная сфера	Диск — сфера
Нагрузка $N$ , Н	16,7	49,0
Скорость скольжения $v$ , м/с	1,2	0,8
Радиус сферы индентора $R_{cf}$ , мм	3,67	4,50
Материал пары трения	Подшипниковая сталь 52100	Сталь 45 твердостью HRC 33...37 (диск) и HRC 43...47 (индентор) [7]

Согласно методике, предложенной в работе [10], для оценки ресурса пары с ТСП, нанесенными методом МН, необходимо определить среднюю поверхностную температуру трения в условиях вакуума ( $p_v = 4$  мПа) по выражению

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

полученному для диапазонов изменения скорости скольжения  $v = 0,087 \dots 0,504$  м/с и контактного давления  $p = 61 \dots 121$  МПа.

Адекватность модели (3) не отвергается при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , так как расчетное значение критерия Фишера  $F$  (1,56) меньше табличного (6,26).

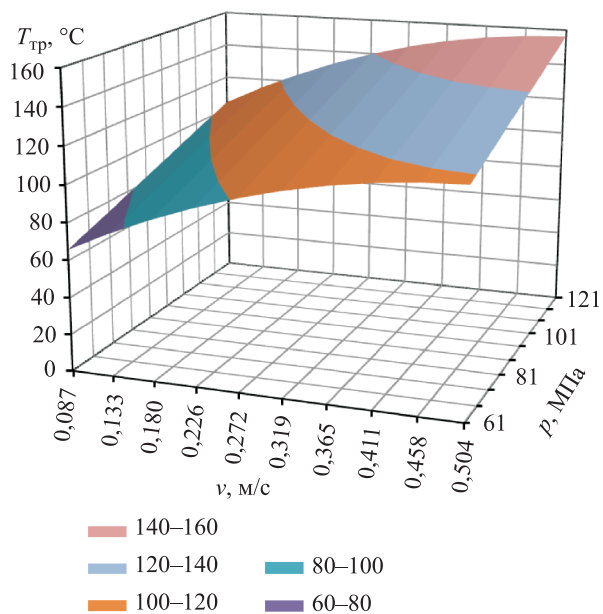


Рис. 5. Графическая интерпретация зависимости  $T_{тр} = f(p, v)$  для ТСП, функционирующих в условиях вакуума

Графическая интерпретация зависимости (3) приведена на рис. 5. Очевидно, что режимы трения при испытаниях на установке Робертса ( $p = 9,46$  МПа,  $v = 1,2$  м/с) выходят за диапазоны изменения скорости скольжения и контактного давления, использованные при получении зависимости (3).

В связи с этим выполнен пересчет средней поверхностной температуры  $T_{тр}$  применительно к условиям трения пары с ТСП, нанесенными методом МН, с корректировками результата (рис. 6).

На первом этапе корректировки пересчет  $T_{тр}$  проведен для «основного» уровня контактного давления  $p = 91$  МПа. Схема пересчета приведе-

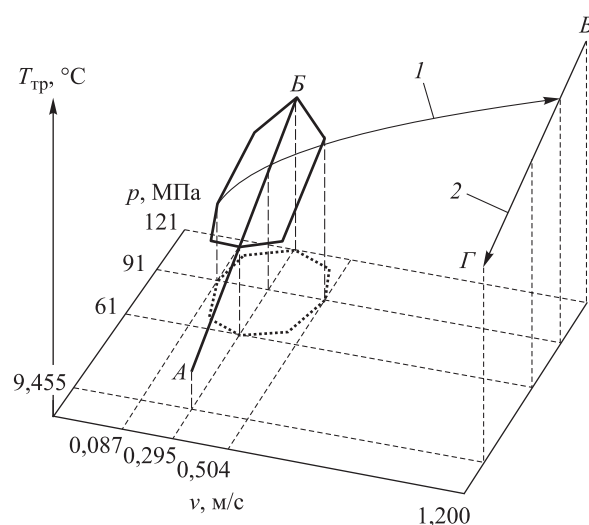


Рис. 6. Схема первой (1) и второй (2) корректировок температуры трения  $T_{тр}$  для условий испытаний трибосопряжений с ТСП, нанесенными методом МН, на установке Робертса

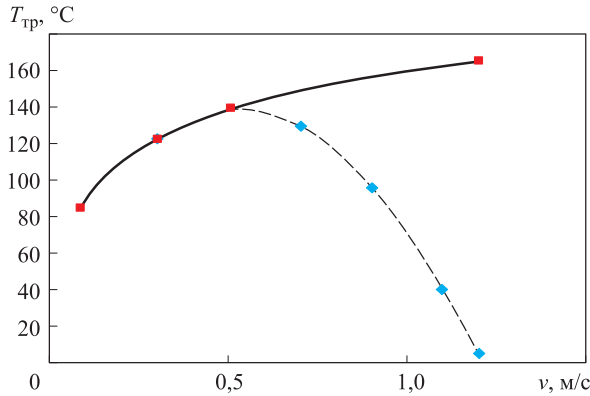


Рис. 7. Схема пересчета поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  на первом этапе корректировки при контактном давлении  $p = 91$  МПа:

◆ — зависимость  $T_{тр} = f(v)$ , полученная по исходной модели; ■ — зависимость  $T_{тр} = f(v)$  с одной коррекцией; — — — — логарифмическая зависимость  $T_{тр} = f(v)$  с одной коррекцией; ····· — полиномиальная зависимость  $T_{тр} = f(v)$

на на рис. 7. При расширении диапазона до искомой скорости скольжения ( $v = 1,2$  м/с) на установке Робертса расчет  $T_{тр}$  с помощью модели (3) некорректен, так как приводит к заниженной оценке поверхностной температуры, что не соответствует физике процесса (см. рис. 7, штриховая кривая).

В связи с этим для адекватной корректировки  $T_{тр}$  до скорости скольжения  $v = 1,2$  м/с использован диапазон  $v = 0,087...0,504$  м/с, при котором получена исходная регрессионная модель (3), где искомая зависимость адекватно описывается уравнением

$$T_{тр} = 30,03 \ln v + 158,75 \quad (4)$$

с последующим расширением интервала изменения скорости скольжения до  $v = 1,2$  м/с. Коэффициент детерминации зависимости (4)  $R^2 = 1$ .

При скорости скольжения  $v = 1,2$  м/с и контактном давлении  $p = 91$  МПа поверхностная температура трения составила  $164,2$  °С.

На втором этапе корректировки пересчет  $T_{тр}$  осуществлялся до искомого контактного давления  $p = 9,455$  МПа согласно рис. 6. Вначале для «основного» уровня  $v = 0,295$  м/с строилась зависимость  $T_{тр} = f(p)$ , представленная на рис. 6 прямой АБ для  $v = 0,295$  м/с (рис. 8), описываемая уравнением

$$T_{тр} = 0,643p + 64,786. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации зависимости (5)  $R^2 = 1$ .

Затем строилась аналогичная линейная зависимость для  $v = 1,2$  м/с (см. рис. 6, прямая ВГ), описываемая выражением

$$T_{тр} = 0,643p + 105,7. \quad (6)$$

Коэффициент детерминации зависимости (6)  $R^2 = 1$ .

Поверхностная температура трения для нагрузочно-скоростных условий работы пары на установке Робертса ( $v = 1,2$  м/с и  $p = 9,455$  МПа), рассчитанная по уравнению (6), составила  $112$  °С.

На следующем этапе проведен расчет ресурса трибосопряжения  $\tau$  с помощью регрессионной зависимости, полученной автором в условиях вакуума и диапазоне поверхностной температуры трения  $T_{тр} = 12...144$  °С, для пары с ТСП типа ВНИИ НП 212, нанесенными методом СН [14]:

$$\tau = 0,3504 T_{тр}^2 - 117,81 T_{тр} + 10046. \quad (7)$$

Коэффициент детерминации зависимости (7)  $R^2 = 0,97$ .

Ресурс трибосопряжения, вычисленный по выражению (7) для ранее определенной температуры трения, составил  $1255$  мин.

Согласно рис. 2, при испытаниях на установке Робертса число циклов до разрушения пары трения с ТСП на основе  $MoS_2$ , нанесенными методом МН, составило  $2 \cdot 10^5$  об., что при частоте вращения диска  $n = 400$  мин<sup>-1</sup> соответствует ресурсу  $\tau = 500$  мин.

Таким образом, ресурс ТСП на основе  $MoS_2$ , нанесенными методом МН, в 2,51 раза меньше,

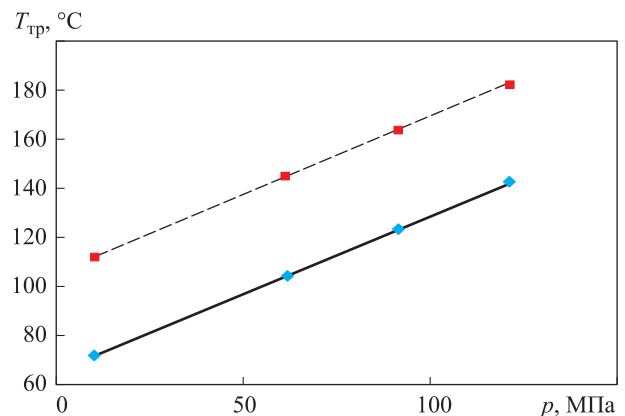


Рис. 8. Схема пересчета поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  на втором этапе корректировки:

◆ —  $T_{тр} = f(p)$  при  $v = 0,295$  м/с; ■ —  $T_{тр} = f(p)$  при  $v = 1,2$  м/с; — — — — линейная зависимость  $T_{тр} = f(p)$  при  $v = 0,295$  м/с; ····· — линейная зависимость  $T_{тр} = f(p)$  при  $v = 1,2$  м/с

Таблица 3

Результаты испытаний ТСП на основе MoS<sub>2</sub> зарубежного производства

Тип ТСП	Толщина ТСП, мкм	Число циклов до разрушения, об.	Коэффициент трения скольжения в установившемся режиме
ТСП со связующим	10 ± 4,0	Более 10 <sup>6</sup>	0,045
ТСП, нанесенное методом МН	1 ± 0,2	2,74 · 10 <sup>5</sup>	0,070

Таблица 4

Результаты испытаний отечественных и зарубежных ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных на металлическую основу, в условиях вакуума

Тип ТСП (марка)	Схема трения	Нагрузка N, Н	Скорость скольжения v, м/с	Контактное давление p, МПа	T <sub>тр</sub> , °С	Коэффициент трения f <sub>тр</sub> в установившемся режиме
МН [1]	Диск – сфера	16,7	1,2	9,46 (расчет автора)	112 (расчет автора)	0,0200
МН [15]	То же	5,9	0,2	–	–	0,0700
СН (ВНИИ НП 212) [12]	»	49,0	0,8	27,7 (расчет автора)	76,9 (расчет автора)	0,0200
СН (данные автора)	Роликовая схема	–	–	–	11,8	0,0540
СН (полиамид-имидная связка) [15]	Диск – сфера	5,9	0,2	–	–	0,0450
Среднее значение						0,0418

чем у ТСП типа ВНИИ НП 212, полученными методом СН.

В целях проверки полученного результата проведено сравнение ресурсов рассматриваемых ТСП зарубежного производства для условий испытаний в вакууме, представленных в работе [15].

В табл. 3 приведены результаты такого сравнения для схемы диск – сферический индентор в условиях вакуума ( $p_v = 7 \cdot 10^{-7}$  Па) при нагрузке  $N = 5,9$  Н, скорости скольжения  $v = 0,2$  м/с (материалы пары трения – нержавеющая сталь 440С) [15]. Анализ полученных данных показал, что число циклов до разрушения ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных методом МН, в 3,65 раза меньше, чем у аналогов зарубежного производства.

**Сравнительная оценка антифрикционных характеристик трибосопряжений с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными методами МН и СН.** Для оценки антифрикционных характеристик трибосопряжений с ТСП типа ВНИИ НП 212, полученными методом СН, в условиях вакуума можно использовать зависимость [14]

$$f_{тр} = 7 \cdot 10^{-6} T_{тр}^2 - 0,002 T_{тр} + 0,190. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации зависимости (8)  $R^2 = 0,826$ .

Для ранее указанных условий коэффициент трения  $f_{тр} = 0,054$ . С учетом данных рис. 2 и работы [15] результаты сравнительной оценки антифрикционных характеристик трибосопряжений с ТСП приведены в табл. 4.

Анализ антифрикционных характеристик ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенных разными методами, показал, что значения коэффициентов трения в установившемся режиме для рассмотренных видов нанесения ТСП в вакууме близки. Среднее значение коэффициента трения составило  $f_{тр} = 0,0418$ .

## Выводы

1. Установлено, что ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенного методом МН на титановую основу, неработоспособно.

2. Удовлетворительную работоспособность пар с ТСП на титановой основе обеспечивает ее

предварительная обработка: гальваническое хромирование и химическое никелирование.

3. Выявлено, что ресурс ТСП, нанесенных методом МН на керамическую основу, больше, чем у ТСП, напыленного методом МН на металлическую основу. Однако, начиная с середины ресурса, появляются отдельные временные «всплески» коэффициента трения, стабилизирующиеся впоследствии.

4. Определено, что ресурс ТСП, нанесенных методом МН, в 2,51 раза меньше, чем у ТСП типа ВНИИ НП 212, полученных методом СН, и в 3,65 раза ниже, чем у ТСП аналогичного типа зарубежного производства.

5. Показано, что для рассмотренных видов нанесения ТСП в вакууме коэффициент трения изменяется от 0,02 до 0,07, а его среднее значение в установившемся режиме составляет 0,0418.

## Литература

- [1] Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS<sub>2</sub> films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, vol. 25, iss. 1, pp. A65–A70, doi: 10.1088/0022-3727/25/1A/012
- [2] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, ЭкоПресс, 2010. 604 с.
- [3] Ковалев Е.П., Игнатъев М.Б., Семенов А.П., Смирнов Н.И., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор). *Трение и износ*, 2004, т. 25, № 3, с. 316–336.
- [4] Haidou Wang, Binshi Xu, Jiajun Liu. *Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication*. Berlin Heidelberg, Science Press Beijing, Springer-Verlag, 2012. 304 p.
- [5] Voevodin A.A., O'Neill J.P., Zabinski J.S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 36–45, doi: 10.1016/S0257-8972(99)00228-5
- [6] Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, iss. 5 spec. iss., pp. 741–748, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.10.008
- [7] Yang J.C., De Groh K.K. Materials issues in the space environment. *MRS Bulletin*, 2010, vol. 35, pp. 12–16.
- [8] Roberts E.W. Towards an optimised sputtered MoS<sub>2</sub> lubricant. *Proceeding of 20<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA Conf. Publ. 2423, 1986, p. 103.
- [9] Хопин П.Н. *Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования*. Москва, МАТИ-РГТУ, 2012. 255 с.
- [10] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2016, № 2, с. 85–90.
- [11] Воронков Б.Д. *Подшипники сухого трения*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 223 с.
- [12] Гамуля Г.Д., Добровольская Г.В., Лебедев И.Л., Южно Т.П. Об ориентировке частиц MoS<sub>2</sub> на поверхности трения твердосмазочных покрытий. *Машиноведение*, 1978, № 6, с. 70–75.
- [13] Курилов Г.В., Удовенко В.Ф., Южно Т.П., Сентюрихина Л.Н., Любарский И.М. Методика исследования твердых смазочных покрытий на основе MoS<sub>2</sub>. *Заводская лаборатория*, 1973, № 1, с. 48–50.
- [14] 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.
- [15] Kazuhisa Miyoshi, Masanori Iwaki, Kenichi Gotoh, Shingo Obara, Kichiro Imagawa. *Friction and Wear Properties of Selected Solid Lubricating Films*. NASA/TM-1999-209088/PART1, 1999. 24 p.

## References

- [1] Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS<sub>2</sub> films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, vol. 25, iss. 1, pp. A65–A70, doi: 10.1088/0022-3727/25/1A/012
- [2] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow, EhkoPress publ., 2010. 604 p.



- [3] Kovalev E.P., Ignatyev M.B., Semenov A.P., Smirnov N.I., Nevolin V.N., Fominskii V.Yu. Solid lubricating coatings for machines and mechanisms operating in extreme conditions summary. *Journal of Friction and Wear*, 2004, vol. 25, no. 3, pp. 316–336.
- [4] Haidou Wang, Binshi Xu, Jiajun Liu. *Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication*. Berlin Heidelberg, Science Press Beijing, Springer-Verlag, 2012. 304 p.
- [5] Voevodin A.A., O'Neill J.P., Zabinski J.S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 36–45, doi: 10.1016/S0257-8972(99)00228-5
- [6] Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, iss. 5 spec. iss., pp. 741–748, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.10.008
- [7] Yang J.C., De Groh K.K. Materials issues in the space environment. *MRS Bulletin*, 2010, 35, 12–16.
- [8] Roberts E.W. Towards an optimised sputtered MoS<sub>2</sub> lubricant. *Proceeding of 20<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA Conf. Publ. 2423, 1986, p. 103.
- [9] Khopin P.N. *Kompleksnaya otsenka rabotosposobnosti par treniya s tverdosmazochnymi pokrytiyami v razlichnykh usloviyakh funkcionirovaniya* [Comprehensive assessment of the performance of friction pairs with hard coatings in different operating conditions]. Moscow, MATI-RGTU publ., 2012. 255 p.
- [10] Khopin P.N. Assessment of operability of couples of friction with solid lubricating coverings in vacuum conditions. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2016, no. 2, pp. 85–90 (in Russ.).
- [11] Voronkov B.D. *Podshipniki sukhogo treniya* [Dry friction bearings]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979. 223 p.
- [12] Gamulya G.D., Dobrovol'skaya G.V., Lebedev I.L., Yukhno T.P. On the orientation of MoS<sub>2</sub> particles on the friction surface of hard coatings. *Mashinovedenie*, 1978, no. 6, pp. 70–75 (in Russ.).
- [13] Kurilov G.V., Udovenko V.F., Yukhno T.P., Sentyurikhina L.N., Lyubarskiy I.M. Methods of investigation of solid lubricant coatings based on MoS<sub>2</sub>. *Zavodskaya laboratoriya*, 1973, no. 1, pp. 48–50 (in Russ.).
- [14] Khopin P.N. Test Analysis of Friction Couples With Solid Lubricant Coatings under Ground–Space Conditions and Prediction of Tribological Characteristics. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 137–144.
- [15] Kazuhisa Miyoshi, Masanori Iwaki, Kenichi Gotoh, Shingo Obara, Kichiro Imagawa. *Friction and Wear Properties of Selected Solid Lubricating Films*. NASA/TM-1999-209088/PART1, 1999. 24 p.

Статья поступила в редакцию 03.04.2019

## Информация об авторах

**ХОПИН Петр Николаевич** — доктор технических наук, доцент 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).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н. Эффективность функционирования трибосопрежений с твёрдосмазочными покрытиями на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными магнетронным и суспензионным методами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9, с. 96–104, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104

### Please cite this article in English as:

Khopin P.N. The Efficiency of Tribocoupling with MoS<sub>2</sub>-Based Solid Lubricant Coatings Using Magnetron and Suspension Sputtering. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 9, pp. 96–104, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104

## Information about the authors

**KHOPIN Petr Nikolaevich** — Doctor of Science (Eng.), Associate 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).