

УДК 621.891:519.28

doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-72-80

# Термокорреляционная оценка ресурса сопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе $\text{MoS}_2$ , нанесенными магнетронным и другими методами, в условиях вакуума

П.Н. Хопин<sup>1</sup>, В.В. Гриб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (НИУ)

## Thermal Correlation Assessment of the Resource of Interfaces with Solid Lubricating Coatings Based On $\text{MoS}_2$ Applied by Magnetron and Other Methods, for Vacuum Conditions

P.N. Khopin<sup>1</sup>, V.V. Grib<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)

<sup>2</sup> National University of Oil and Gas «Gubkin University»

Проведен анализ триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенными разными способами, по результатам испытаний в условиях вакуума. На основе выполненной оценки нагрузочно-скоростных характеристик указанных сопряжений рассчитана поверхностная температура трения. По результатам трибологических испытаний в условиях вакуума определена термокорреляционная зависимость ресурса пары трения с твердосмазочными покрытиями на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенными суспензионным и вакуумными (магнетронным и высокочастотным) методами, от поверхностной температуры трения сопряжения. На основе этой зависимости предложена методика расчета ресурса исследуемых трибосопряжений.

**Ключевые слова:** твердосмазочные покрытия, магнетронное и высокочастотное нанесение, вакуумные условия, методика оценки ресурса

The analysis of tribotechnical parameters of interfaces with solid lubricating coatings based on  $\text{MoS}_2$ , applied by different methods, was carried out according to the results of tests in vacuum. The surface friction temperature is calculated on the basis of the performed assessment of the load-speed characteristics of these interfaces. Based on the results of tribovacuum tests, the thermocorrelation dependence of the resource of a friction pair with solid lubricating coatings  $\text{MoS}_2$ , applied by vacuum (magnetron and high-frequency) and suspension methods, on the surface friction temperature of the interface was determined. On the basis of this dependence, a method for calculating the resource of the studied tribointerfaces is proposed.

**Keywords:** solid lubricating coatings, magnetron and high frequency application, vacuum conditions, resource assessment technique

В настоящее время для смазки узлов трения трибосопряжений, функционирующих в условиях космоса, широко применяют твердосмазочные покрытия (ТСП), в частности на основе дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) [1–4]. Ученые исследуют ТСП, полученные как традиционным методом суспензионного нанесения (СН), так и методами магнетронного (МН) и высокочастотного (ВН) нанесения.

Цель работы — разработка методики оценки ресурса трибосопряжений с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенных методами СН, МН и ВН, в условиях вакуума [5–7].

**Материалы и инструменты.** Анализ литературных источников показал, что одно из самых подробных исследований в этом направлении проведено в работах [8, 9]. Эксперименты выполнены в условиях вакуума (при давлении газа  $p_v = 7 \cdot 10^{-7}$  Па) на установке, разработанной К. Мисуоши (далее установка Мисуоши), для проведения трибологических испытаний пары трения по схеме диск — шар (рис. 1). Такая открытая схема трения является оптимальной для изучения воздействия вакуумных условий на поверхности.

Исследованы ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , полученные методами СН (ТСП<sub>СН</sub>) и МН (ТСП<sub>МН</sub>) и другого типа [8, 9]. В качестве материала диска и контртела — шара диаметром 6 мм — выбрана коррозионно-стойкая сталь 440С. Параметры ТСП, исследованных на установке Мисуоши, приведены в табл. 1.

Нагрузочно-скоростными параметрами трибологических испытаний на установке К. Мисуоши [9] в условиях вакуума являлись нагрузка  $F = 5,9$  Н и скорость скольжения  $v = 0,2$  м/с.

В работе [10] описан метод ВН ТСП (ТСП<sub>ВН</sub>) и приведены результаты трибологических ис-

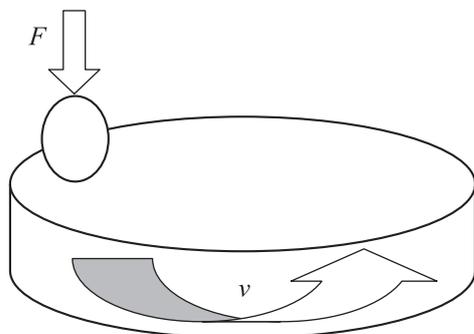


Рис. 1. Схема трибологических испытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума на установке К. Мисуоши, работающей по схеме диск — шар

Таблица 1

Параметры ТСП, исследованных на установке Мисуоши

Тип	Состав	Толщина $\delta$ , мкм
ТСП <sub>СН</sub>	$\text{MoS}_2$ , полиамид-имидное связующее (остальные компоненты не раскрыты)	$10 \pm 4$
ТСП <sub>МН</sub>	$\text{MoS}_2$	$1,0 \pm 0,2$

пытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума ( $p_v = 0,133$  мкПа) на установке, разработанной Т. Спалвинсом (далее установка Спалвинса), работающей по схеме трения диск — шар (рис. 2). Перед нанесением покрытия выполнена предварительная очистка образца, на который подавался отрицательный потенциал 2...5 кВ по отношению к экрану.

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

Различными методами исследования показано, что покрытие, имеющее чрезвычайно малый размер частиц (менее 3 нм) является бездефектным и очень плотным.

Основные параметры трибологических испытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума на установке Т. Спалвинса [10, 11] приведены в табл. 2.

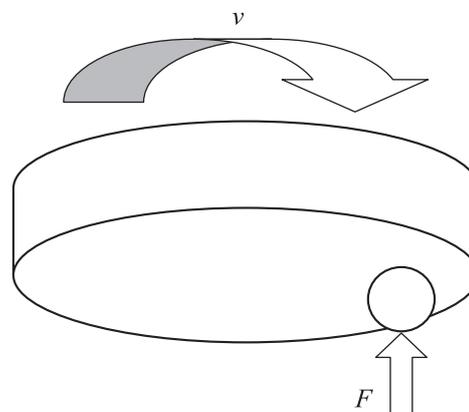


Рис. 2. Схема трибологических испытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума на установке Т. Спалвинса, работающей по схеме диск — шар

Таблица 2

**Основные параметры  
трибологических испытаний пары трения с ТСП  
в условиях вакуума на установке Т. Спалвинса**

Толщина ТСП $\delta$ , мкм	Материал пары трения	Радиус шара $R_{ш}$ , мм
0,20	440С	4,75
0,65	440С	4,75

**Обсуждение результатов.** Результаты трибологических испытаний пары трения диск — шар с ТСП на основе  $MoS_2$ , нанесенными методами СН и МН, на установке К. Мисуоши [8, 9] (см. рис. 1) в условиях вакуума, приведены в табл. 3.

**Оценка ресурса пары трения с ТСП<sub>СН</sub> при проведении трибологических испытаний на установке Мисуоши в условиях вакуума.** Контактное давление при испытаниях на трение в условиях вакуума рассчитано с помощью относительного (к нормальной нагрузке  $F$  и пути трения  $L$ ) износа шара  $I$ . Для расчета пути трения использована частота вращения диска  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$ , взятая из работы [8].

При числе оборотов до разрушения ТСП<sub>СН</sub>  $N = 1000\ 000$  об. (см. табл. 3) расчетный путь трения  $L = 10\ 000$  м. Для относительного износа шара (см. табл. 3)  $I = 0,13 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  диаметр пятна износа  $D = 0,465$  мм. При нагрузке  $F = 5,9$  Н и пути трения  $L = 10\ 000$  м контактное давление  $p = 34,7$  МПа.

Чтобы оценить ресурс работы пары трения с ТСП согласно методике, предложенной в работах [12, 13], необходимо рассчитать поверхностную температуру трения  $T_{тр}$ , °С, в условиях вакуума ( $p_v = 4$  мПа) по выражению

$$T_{тр} = 3,31 + 291,64v + 0,643p - 282,19v^2, \quad (1)$$

Таблица 3

**Результаты испытаний пары трения с ТСП на трение и износ на установке К. Мисуоши  
в условиях вакуума**

Тип ТСП	Коэффициент трения в установившемся режиме $f_{тр}$	Число циклов (оборотов) до разрушения* $N$ , об.	Относительный износ $I \cdot 10^8$ , $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	
			диска с ТСП	шара
ТСП <sub>СН</sub>	0,045	Более 1 000 000	6	0,13
ТСП <sub>МН</sub>	0,070	274 130	9	0,25

\* Параметр определялся до полного износа пары трения при возрастании  $f_{тр}$  до 0,3.

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

Температура трения непрерывно измерялась в процессе экспериментов с помощью термопары трения, установленной в непосредственной близости от места контакта в отверстие контртела, с последующей тарировкой с применением наружной термопары трения при имитации нагрева зоны контакта. Пересчет в поверхностную температуру  $T_{тр}$  проводился с помощью тарировочной зависимости.

Очевидно, что режимы трения при испытаниях на установке Мисуоши ( $p = 34,7$  МПа,  $v = 0,2$  м/с) выходят по значению контактного давления за диапазон его изменения, использованный при получении формулы (1).

В связи с этим выполнен пересчет средней поверхностной температуры трения применительно к условиям трения пары с ТСП<sub>СН</sub> на основе  $MoS_2$  с корректировками результата по схеме, приведенной на рис. 3.

На первом этапе корректировки пересчет температуры  $T_{тр}$  проведен путем перехода из точки (т.) В к т. Е (соответствующей искомой скорости скольжения  $v = 0,2$  м/с) по кривой, соответствующей сечению поверхности  $T_{тр} = f(p, v)$  вертикальной плоскостью при  $p = 91$  МПа.

Результаты первого этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для пары трения с ТСП<sub>СН</sub> приведены на рис. 4. Точки Е и В соответствуют таковым, показанным на рис. 3. Для основного уровня параметров ( $p = 91$  МПа и  $v = 0,2$  м/с) поверхностная температура трения  $T_{тр} = 109$  °С.

На втором этапе корректировки пересчет температуры  $T_{тр}$  выполнен путем перехода из т. Е к т. И ( $p = 34,7$  МПа,  $v = 0,2$  м/с) за счет перехода от кривой АБВГ (соответствующей  $v = 0,295$  м/с) к кривой ДЕЖЗ ( $v = 0,200$  м/с). Этот переход осуществлялся уменьшением ординаты

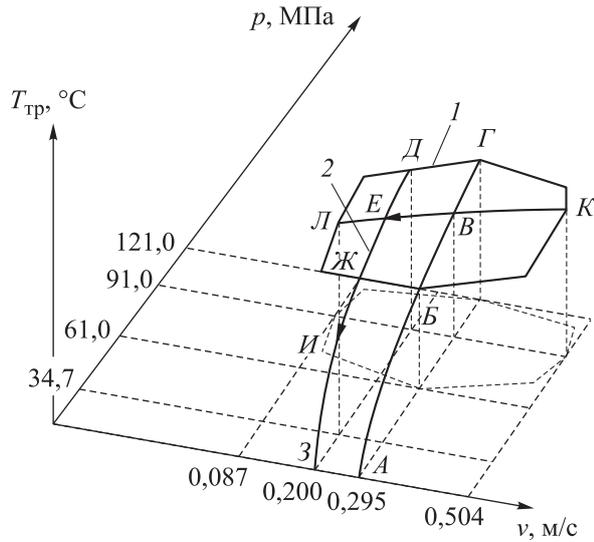


Рис. 3. Схема первого (1) и второго (2) этапов корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для условий испытаний трибосопряжения с ТСП<sub>СН</sub>

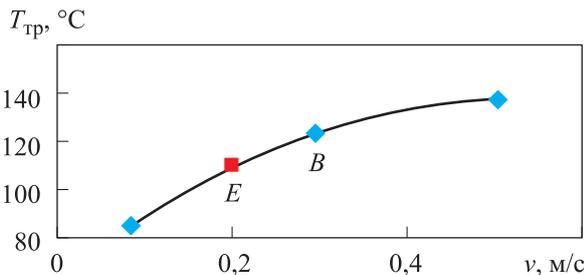


Рис. 4. Результаты первого этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для пары трения с ТСП<sub>СН</sub>:

◆ — зависимость  $T_{тр} = f(p, v)$  при контактном давлении  $p = 91$  МПа; ■ — температура  $T_{тр}$  в т. E при скорости скольжения  $v = 0,2$  м/с; — — полиномиальная зависимость  $T_{тр} = -282,19 v^2 + 291,64 v + 61,823$  (с коэффициентом детерминации  $R^2 = 1$ ) при  $p = 91$  МПа

т. E относительно т. B. На это же значение снижались ординаты т. Ж и т. Д. Для т. З, соответствующей нулевому контактному давлению, ордината принята равной  $T_{тр} = 0$  °С.

Вначале для основного уровня скорости скольжения  $v = 0,295$  м/с строилась зависимость  $T_{тр} = f(p)$ , представленная на рис. 3 прямой АБВГ (с учетом точки, соответствующей нулевому контактному давлению, при котором  $T_{тр} = 0$  °С), описываемая уравнением

$$T_{тр} = -0,008p^2 + 2,127p + 0,5624. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации зависимости (2)  $R^2 = 0,9970$ .

Затем строилась аналогичная зависимость для скорости скольжения  $v = 0,200$  м/с

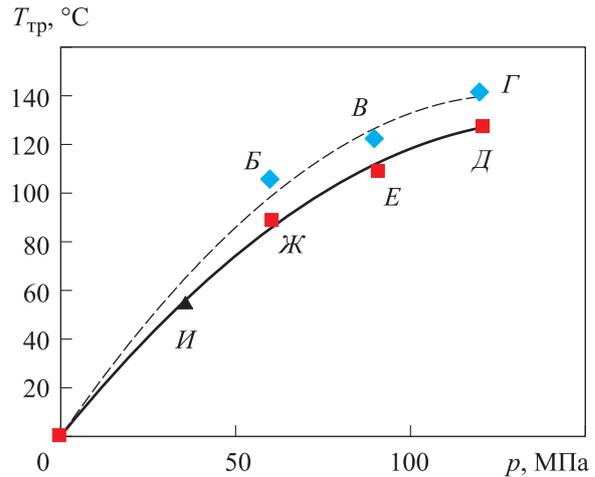


Рис. 5. Результаты второго этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для ТСП<sub>СН</sub>:

◆ и ■ — точки зависимости  $T_{тр} = f(p)$  при скорости скольжения  $v = 0,295$  и  $0,200$  м/с; ▲ — температура т. И  $T_{тр} = 55,3$  °С для  $p = 34,7$  МПа,  $v = 0,200$  м/с; — — и — — полиномиальные зависимости  $T_{тр} = f(p)$  при скорости скольжения  $v = 0,295$  и  $0,200$  м/с

(см. рис. 3, прямая ДЕЖЗ), определяемая выражением

$$T_{тр} = -0,0062p^2 + 1,7975p + 0,4374. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации зависимости (3)  $R^2 = 0,9977$ .

Результаты второго этапа корректировки поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  для рассматриваемого ТСП<sub>СН</sub> приведены на рис. 5. Точки Б–Ж соответствуют таковым, показанным на рис. 3

Согласно уравнению (3), для контактного давления  $p = 34,7$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,2$  м/с поверхностная температура трения пары трения с ТСП<sub>СН</sub> на основе MoS<sub>2</sub> с полиамид-имидным связующим  $T_{тр} = 55,3$  °С. Для числа оборотов до разрушения  $N = 10^6$  об. и частоте вращения  $n = 120$  мин<sup>-1</sup> ресурс пары трения с ТСП<sub>СН</sub>  $\tau = 8333$  мин.

**Оценка ресурса пары трения с ТСП<sub>МН</sub> при проведении трибологических испытаний в условиях вакуума на установке Мисуоши, работающей по схеме диск — шар [8, 9].** Для нанесения ТСП на основе MoS<sub>2</sub> на диск из стали 440С использована магнетронная высокочастотная система при следующих режимах [8]: мощность оборудования ионного травления подложки перед нанесением ТСП — 550 Вт; давление аргона — 2,7 Па; скорость нанесения

ТСП — 110 нм/мин; температура нанесения ТСП — комнатная.

Для относительного износа шара (см. табл. 3)  $I = 0,25 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  и нагрузки  $F = 5,9 \text{ Н}$  проведен расчет параметров по предложенной методике. Путь трения составил 27 415 м, диаметр пятна износа — 0,3963 мм, контактное давление — 49,17 МПа.

С помощью уравнения (1) для  $p = 49,17 \text{ МПа}$  и  $v = 0,2 \text{ м/с}$  для пары трения с ТСП<sub>МН</sub> рассчитана поверхностная температура трения  $T_{\text{тр}} = 73,83 \text{ }^\circ\text{C}$ . При числе оборотов до разрушения  $N = 274\,130 \text{ об.}$  и частоте вращения  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$  ресурс пары трения с ТСП<sub>МН</sub> соответствует  $\tau = 2284 \text{ мин.}$

**Оценка ресурса пары трения с ТСП<sub>ВН</sub> со смещением по постоянному току при проведении трибологических испытаний в условиях вакуума на установке Спалвинса [10, 11].** Расчет проведен для ТСП<sub>ВН</sub>, условия и результаты испытаний которых описаны в публикациях [10, 11]. В работе [11] приведена диаграмма сравнительного ресурса для пар трения с ТСП, нанесенных разными методами (рис. 6).

Здесь видно, что наибольший ресурс имеет ТСП, полученное методом ВН с источником постоянного тока толщиной  $\delta = 0,2 \text{ мкм}$ . Для сопряжений с ТСП<sub>СН</sub> в работе [11] не указан состав ТСП со связующим и условия проведения испытаний, хотя эти факторы определяющим образом сказываются на триботехнических показателях фрикционных сопряжений.

Если результаты трибологических испытаний первого ТСП были найдены в работе [10], то для ТСП со связующим, тип последнего не был указан.

Основные нагрузочно-скоростные параметры трибологических испытаний пары трения диск — шар в работах К. Мисуоси [8] и Т. Спалвинса [10] (табл. 4) близки. В связи с этим для расчета контактного давления в ра-

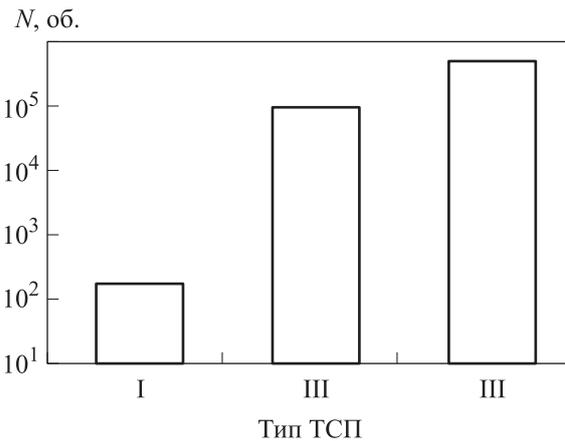


Рис. 6. Зависимость числа оборотов до разрушения  $N$  от типа ТСП:

I — натертое покрытие; II — ТСП со связующей смолой толщиной  $\delta = 13 \text{ мкм}$ ; III — ТСП толщиной  $\delta = 0,2 \text{ мкм}$ , нанесенное методом ВН со смещением по постоянному току

Таблица 4

Нагрузочно-скоростные параметры трибологических испытаний пары трения с ТСП в условиях вакуума

Литературный источник	$R_{\text{ш}}, \text{ мм}$	$v, \text{ м/с}$	$F, \text{ Н}$	$D, \text{ мм}$
[9]	6,00	0,200	5,9	0,3963
[10]	4,75	0,166 0,266	2,5 9,8	—

боте [10] использована площадь износа шара, полученная при испытаниях ТСП<sub>МН</sub> в работе К. Мисуоси [8], а диаметр пятна износа шара  $D$  для испытаний на установке Спалвинса принят равным 0,3963 мм.

Тогда для трибологических испытаний Т. Спалвинса площадь пятна контакта ТСП<sub>ВН</sub> со смещением по постоянному току составит  $1,233 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ .

Результаты трибологических испытаний на установке Спалвинса [10] и расчета контактного давления в условиях вакуума для пары трения с ТСП<sub>ВН</sub> приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты вакуумных трибологических испытаний на установке Спалвинса и расчета контактного давления в условиях вакуума для пары трения с ТСП<sub>ВН</sub>

Номер опыта	Нагрузочно-скоростные параметры			Параметры		
				испытаний		расчета
	$F, \text{ Н}$	$n, \text{ мин}^{-1}$	$v, \text{ м/с}$	$N, \text{ об.}$	$f_{\text{тр}}$	$p, \text{ МПа}$
1	2,45	50	0,166	500 000	0,04	20,28
2	9,8	80	0,266	38 000	0,02	79,50

Согласно предложенной методике [12], для оценки ресурса пары трения с ТСП необходимо рассчитать среднюю поверхностную температуру трения с помощью зависимости (1). Для условий первого опыта (см. табл. 5) за диапазоны исследованных параметров выходит контактное давление  $p$ . В этой связи с использованием предложенной методики корректировки проведен пересчет поверхностной температуры трения  $T_{тр}$ .

Для первого опыта расчетная поверхностная температура трения  $T_{тр1} = 34,57\text{ °C}$ , ресурс  $\tau_1 = 10\ 000$  мин, для второго —  $T_{тр2} = 122\text{ °C}$ ,  $\tau_2 = 475$  мин.

**Сравнительная оценка ресурса пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, полученных методами СН, МН и ВН.** Результаты трибологических испытаний и расчета ресурса и поверхностной температуры трения в условиях вакуума для пары трения с ТСП, нанесенными разными методами, приведены в табл. 6.

С использованием данных табл. 6 построена термокорреляционная зависимость ресурса пары трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, полученными методами СН и ВН, от поверхностной температуры трения (рис. 7).

Анализ данных рис. 7 позволяет сделать вывод, что зависимость ресурса пар трения с ТСП, полученными методом ВН, от поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  подчиняется экспоненциальному закону. Для диапазона поверхностной температуры трения  $T_{тр} = 55...112\text{ °C}$  она удовлетворительно описывается выражением

$$\tau = 39851e^{-0,039T_{тр}} \quad (4)$$

Коэффициент детерминации зависимости (4)  $R^2 = 0,9993$ .

Таблица 6

**Результаты трибологических испытаний и расчета ресурса и поверхностной температуры в условиях вакуума для пары трения с ТСП, полученными разными методами**

Метод нанесения ТСП	$p$ , МПа	$v$ , м/с	$T_{тр}$ , °C	$\tau$ , мин	$\delta$ , мкм
СН	34,70	0,200	55,30	8333	$10,00 \pm 4,00$
МН	47,17	0,200	73,83	2284	$1,00 \pm 0,20$
ВН	20,30	0,166	34,57	10 000	0,20
	79,50	0,266	112,00	475	0,65

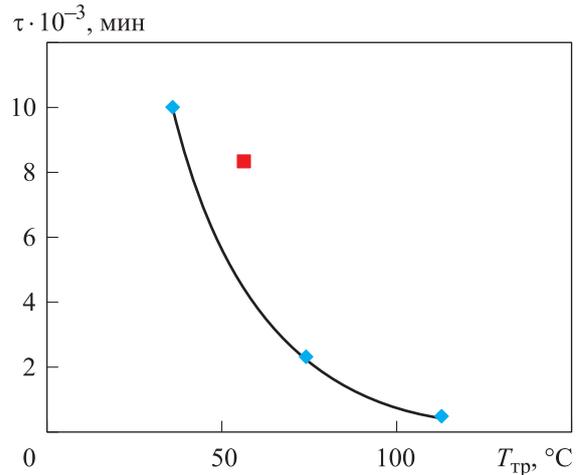


Рис. 7. Термокорреляционная зависимость ресурса  $\tau$  пары трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными разными методами, от поверхностной температуры трения  $T_{тр}$ :  
 ■ и ◆ — экспериментальные значения для ТСП<sub>СН</sub> и ТСП<sub>ВН</sub>; — экспоненциальная зависимость  $\tau = 39851e^{-0,039T_{тр}}$  для ТСП<sub>ВН</sub>

Предложенный ранее алгоритм расчета ресурса для произвольного сочетания контактного давления  $p$  и скорости скольжения  $v$  пары трения с ТСП<sub>СН</sub> на основе MoS<sub>2</sub> [14] может быть использован для ТСП, полученных методами МН и ВН.

Для оценки ресурса пары трения с ТСП указанного типа можно рекомендовать следующую последовательность расчета:

- оценка эксплуатационных характеристик работы пары трения: контактного давления  $p$  и скорости скольжения  $v$ ;
- определение поверхностной температуры трения  $T_{тр}$  по формуле (1);
- расчет ресурса  $\tau$  с использованием термокорреляционной зависимости  $\tau = f(T_{тр})$ ; в случае функционирования узла при повышенной температуре образца она складывается с  $T_{тр}$ .

Согласно данным табл. 6 и работы [15], толщина ТСП, нанесенных вакуумными методами, должна составлять не менее 0,2 мкм. Это подтверждено результатами испытаний [8], для ТСП<sub>МН</sub> толщиной 0,11 мкм, показавшими существенно меньший ресурс пары трения.

Сравнительная оценка ресурса трибосопряжений с ТСП, нанесенными разными методами и функционирующими в условиях вакуума, показала, что согласно данным одного исследователя [10] ресурс ТСП<sub>ВН</sub> больше, чем у ТСП<sub>СН</sub> (рис. 6). Тогда как по данным другого исследователя [8] для ТСП<sub>МН</sub> наблюдается обратная

картина (см. табл. 3). Соотношение ресурса соприжений с ТСП, нанесенных суспензионным и вакуумными методами, требует дополнительных исследований.

## Выводы

1. Проведена оценка поверхностной температуры трения пар с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенных суспензионным и вакуумными (магнетронным и высокочастотным) методами, с расширением диапазонов параметров контактной нагрузки и скорости скольжения.

2. Определена термокорреляционная зависимость ресурса пары трения с ТСП, полученными вакуумными методами (МН и ВН) нане-

сения  $\text{MoS}_2$  от поверхностной температуры трения.

3. Разработана методика оценки ресурса пар трения с ТСП, напыленными вакуумными методами нанесения  $\text{MoS}_2$ , функционирующими в условиях вакуума, на основе использования универсальной зависимости поверхностной температуры трения от нагрузочно-скоростных параметров трибосопряжения и корреляционной зависимости его ресурса от температуры трения.

4. Выявлено, что для обеспечения удовлетворительного ресурса трибосопряжения толщина ТСП, нанесенных вакуумными методами, должна составлять не менее 0,2 мкм.

## Литература

- [1] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, ЭкоПресс, 2010. 604 с.
- [2] Гриб В.В., Лазарев Г.Е. *Лабораторные испытания материалов на трение и износ*. Москва, Наука, 1968. 141 с.
- [3] Wang H., Xu B., Liu J. *Micro and nano sulfide solid lubrication*. Springer, 2012. 304 p.
- [4] Voevodin A.A., O'Neill J.P., Zabinski J.S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. *Surf. Coat. Technol.*, 1999, vol. 116–119, pp. 36–45, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00228-5)
- [5] Gao X., Fu Y., Jiang D., et al. Responses of TMDs-metals composite films to atomic oxygen exposure. *J. Alloys Compd.*, 2018, vol. 765, pp. 854–861, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.311>
- [6] Dugger M.T., Scharf T.W., Prasad S.V. Materials in space: exploring the effect of low earth orbit on thin film solid lubricants. *Advanced Mater. & Process.*, 2014, pp. 32–35.
- [7] Guo C., Chen F., Wei B.-L., et al. Microstructure and tribological properties of a laser clad NiCr-based composite coating in high vacuum at elevated temperature, atomic oxygen and ultraviolet (UV) irradiation environments. *LIE*, 2019, vol. 44, no. 4-6, pp. 355–370.
- [8] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. Glenn Research Center, 2000. 399 p.
- [9] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K., et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. Glenn Research Center, 1999. 30 p.
- [10] Spalvins T. *Lubrication with sputtered  $\text{MoS}_2$  films*. Lewis Research Center, 1971. 18 p.
- [11] Spalvins T. *Sputtering — a vacuum deposition method for coating material*. Lewis Research Center, 1972. 18 p.
- [12] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2016, № 2, с. 85–90.
- [13] 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.
- [14] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума на основе термокорреляционных зависимостей. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 7, с. 317–320.
- [15] Spalvins T. *Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control*. Lewis Research Center, 1991. 20 p.

## References

- [1] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wearing and lubrication)]. Moscow, EkoPress Publ., 2010. 604 p.
- [2] Grib V.V., Lazarev G.E. *Laboratornye ispytaniya materialov na trenie i iznos* [Laboratory friction and wearing tests for materials]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 141 p.
- [3] Wang H., Xu B., Liu J. *Micro and nano sulfide solid lubrication*. Springer, 2012. 304 p.
- [4] Voevodin A.A., O'Neill J.P., Zabinski J.S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. *Surf. Coat. Technol.*, 1999, vol. 116–119, pp. 36–45, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00228-5)
- [5] Gao X., Fu Y., Jiang D., et al. Responses of TMDs-metals composite films to atomic oxygen exposure. *J. Alloys Compd.*, 2018, vol. 765, pp. 854–861, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.311>
- [6] Dugger M.T., Scharf T.W., Prasad S.V. Materials in space: exploring the effect of low earth orbit on thin film solid lubricants. *Advanced Mater. & Process.*, 2014, pp. 32–35.
- [7] Guo C., Chen F., Wei B.-L., et al. Microstructure and tribological properties of a laser clad NiCr-based composite coating in high vacuum at elevated temperature, atomic oxygen and ultraviolet (UV) irradiation environments. *LIE*, 2019, vol. 44, no. 4–6, pp. 355–370.
- [8] Miyoshi K. *Solid lubrication. Fundamentals and applications*. Glenn Research Center, 2000. 399 p.
- [9] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K., et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. Glenn Research Center, 1999. 30 p.
- [10] Spalvins T. *Lubrication with sputtered MOS<sub>2</sub> films*. Lewis Research Center, 1971. 18 p.
- [11] Spalvins T. *Sputtering — a vacuum deposition method for coating material*. Lewis Research Center, 1972. 18 p.
- [12] 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.).
- [13] Khopin P.N. Test analysis of friction couples with solid lubricant coatings underground-space conditions and prediction of tribological characteristics. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 175–183 (in Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear.*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020071>)
- [14] Khopin P.N. An assessment of operability of friction couples with solid lubricating coatings in vacuum conditions on the basis of thermocorrelation dependences. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*, 2017, no. 7, pp. 317–320 (in Russ.).
- [15] Spalvins T. *Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control*. Lewis Research Center, 1991. 20 p.

Статья поступила в редакцию 09.02.2021

## 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).

**ГРИБ Владимир Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика». ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (НИУ)» (119991, Москва, Российская Федерация, Ленинский проспект, д. 65, корп. 1, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru).

## Information about the authors

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

**GRIB Vladimir Vasilievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technical Mechanics. National University of Oil and Gas «Gubkin University» (119991, Moscow, Russian Federation, 65 Leninsky Prospekt, building 1, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н., Гриб В.В. Термокорреляционная оценка ресурса сопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе  $\text{MoS}_2$ , нанесенными магнетронным и другими методами, в условиях вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 7, с. 72–80, doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-72-80

### Please cite this article in English as:

Khopin P.N., Grib V.V. Thermal Correlation Assessment of the Resource of Interfaces with Solid Lubricating Coatings Based On  $\text{MoS}_2$  Applied by Magnetron and Other Methods, for Vacuum Conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 7, pp. 72–80, doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-72-80



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Схемотехническое моделирование источников электропитания»

Автор **М.В. Родин**

На конкретных примерах рассмотрены особенности схемотехнического компьютерного моделирования типовых схем выпрямителей, сглаживающих фильтров, импульсных модуляторов, линейных и импульсных стабилизаторов постоянного напряжения, а также модуляционных источников электропитания в программных пакетах Micro-Cap и OrCAD PSpice. Приведены краткие теоретические сведения об источниках электропитания радиоэлектронной аппаратуры, а также контрольные вопросы и задания для самостоятельной подготовки студентов.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств». Может быть полезно аспирантам, преподавателям и инженерно-техническим работникам, занимающимся схемотехническим моделированием источников электропитания.

### 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; www.baumanpress.ru