

УДК 621.891:519.28

Сравнительная оценка триботехнических свойств перспективного твердосмазочного покрытия ЭОНИТ-3, отечественных и зарубежных покрытий для условий вакуума

П.Н. Хопин, С.Ю. Мишаков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Comparative assessment of tribotechnical properties of the promising EONIT-3, solid-lubricant coating, domestic and foreign coatings for vacuum conditions

P.N. Khopin, S.Yu. Mishakov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

В условиях вакуума выполнен анализ триботехнических характеристик перспективного твердосмазочного покрытия ЭОНИТ-3 на основе графита и MoS_2 суспензионного нанесения, а также отечественных и зарубежных покрытий на основе MoS_2 , нанесенных разными способами. По термокорреляционным зависимостям ресурса от температуры испытаний установлено, что в условиях вакуума при суммарной температуре трения 20...112 °C ресурс покрытия ЭОНИТ-3 больше, чем у традиционного ВНИИ НП-212 (в 2–7 раз) и зарубежных покрытий на основе MoS_2 магнетронного и высокочастотного нанесения (в 1,3–8 раз). При объемной температуре нагрева 250...400 °C в условиях вакуума ресурс пары трения с покрытием ЭОНИТ-3 снижается до 8...9 ч, а коэффициент трения пары при триботехнических испытаниях в условиях вакуума во всем исследованном диапазоне температур трения 20...496 °C остается почти неизменным на уровне 0,06. Для пар трения с покрытием ЭОНИТ-3 получены термокорреляционные зависимости ресурса и коэффициента трения от температуры испытаний.

EDN: DLEPZV, <https://elibrary/dlepzv>

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, термокорреляционные зависимости, триботехнические характеристики, условия вакуума

The paper presents results of analyzing in the vacuum conditions the tribological characteristics of the EONIT-3 promising solid lubricating coating based on graphite and MoS_2 of suspension application and the domestic and foreign coatings based on the MoS_2 applied by different methods. The resource thermocorrelation dependences on the testing temperature make it possible to establish that in the vacuum conditions at the total friction temperature of 20...112 °C, the EONIT-3 coating resource is higher than that of the traditional VNIИ NP 212 (by 2–7 times) and the foreign coatings based on the MoS_2 with magnetron and high-frequency application (by 1.3–8 times). At the volumetric heating temperature of 250...400 °C under the vacuum conditions, the friction pair resource with the EONIT-3 coating decreases to 8...9 h. At the same time, the pair friction coefficient during tribologi-

cal testing under the vacuum conditions remains almost unchanged (at the level of 0.06) in the entire studied range of the friction temperatures of 20...496 °C. For friction pairs with the EONIT-3 coating, the resource thermocorrelation and friction coefficient dependencies on the testing temperature are obtained.

EDN: DLEPZV, <https://elibrary/dlepzv>

Keywords: solid lubricating coating, thermocorrelation dependencies, tribological characteristics, vacuum conditions

Обеспечение работоспособности высокоэффективных смазочных материалов — одна из важнейших задач, решаемых в узлах трения механизмов, эксплуатируемых в условиях нормальной атмосферы и вакууме. К наиболее перспективным материалам, предназначенным для работы в указанных условиях, относятся твердосмазочные покрытия (ТСП), самосмазывающиеся материалы, радиационно стойкие смазочные композиции, керамические материалы и пластичные смазочные материалы [1–3].

Основными достоинствами ТСП являются малая испаряемость в вакууме, низкий коэффициент трения, работоспособность в широком диапазоне нагрузок и температур (–200...+350 °C), стабильность под действием космических излучений [4–7].

Хорошие триботехнические характеристики должны быть обеспечены как для нормальной атмосферы в процессе опробывания в условиях Земли, так и в случае длительного пребывания и функционирования в вакууме при различных излучениях. Согласно литературным данным, одним из самых эффективных отечественных ТСП является ЭОНИТ-3 [8].

Цель работы — сравнительный анализ триботехнических характеристик ТСП ЭОНИТ-3, отечественных и зарубежных ТСП и получение выражений, позволяющих оценивать триботехнические параметры ТСП при произвольном сочетании нагрузочно-скоростных и температурных условий функционирования узлов в вакууме.

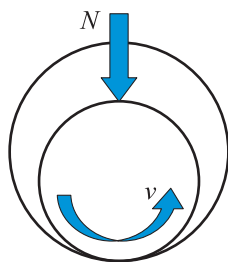


Рис. 1. Схема испытания на трение и износ пары трения вал — втулка с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума

Результаты исследования и их обсуждение.

Материалы и методы исследования. Среди ТСП типа ВНИИ НП наиболее широкое применение получило покрытие ЭОНИТ-3 [8]. ТСП ЭОНИТ-3 (ТУ 38 401408–83) представляет собой суспензию на основе полиаминимидной смолы ПАИС, модифицированной мочевиноформальдегидной смолой и содержащей в качестве антифрикционного компонента смесь графита и дисульфида молибдена MoS_2 . Это ТСП предназначено для узлов трения, работающих в различных газовых средах в диапазоне температур от минус 196 до плюс 250 °C (кратковременно до плюс 400 °C).

Испытание на трение и износ в условиях вакуума проводили по схеме вал — втулка вращательного движения (рис. 1). Вал диаметром 10 мм и контртело (втулку) изготавливали из стали 20Х13. Испытания выполняли до истирания ТСП.

Сравнительная оценка ресурса пары трения с ТСП ЭОНИТ-3 для условий вакуума.

Результаты триботехнических испытаний пары трения с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума (10^{-4} мм рт. ст.) при скорости скольжения $v = 0,25$ м/с приведены в табл. 1 и на рис. 2 [1].

Как видно из рис. 2, ресурс τ пар трения ТСП ЭОНИТ-3 зависит от температуры испытаний T и контактного давления p . Однако влияние на ресурс пар трения температуры испытаний в диапазоне 20...250 °C, поверхностной температуры трения $T_{\text{тр}}$, определяемой нагрузочно-скоростными условиями сопряжения, и скорости скольжения v не проанализировано и требует уточнения.

Результаты ранее проведенных экспериментальных исследований в условиях вакуума [9] подтвердили определяющее влияние температурного фактора на ресурс рассматриваемой пары трения с ТСП. Разработан алгоритм его расчета, основанный на оценке контактной температуры трения $T_{\text{тр}}$ по известным зависимостям $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ с последующим расчетом ресурса по корреляционным зависимостям

Таблица 1

Результаты триботехнических испытаний пары трения вал — втулка с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума при скорости скольжения $v = 0,25$ м/с

Номер опыта	Контактное давление p , МПа	Объемная температура нагрева $T_{об}$, °С	Коэффициент трения $f_{тр}$	Ресурс τ	
				ч	мин
1	27	20	0,06	630,0	37 800
2	45	20	0,10	37,0	2220
3	58	20	0,04	33,0	1980
4	27	250	0,06	230,0	13 800
5	45	250	0,06	13,6	816
6	58	250	0,06	8,0	480
7	27	400	0,06	27,0	1620
8	45	400	0,05	16,0	960
9	58	400	0,04	9,0	540

$\tau = f(T_{тр})$ (в случае функционирования узла при повышенной температуре последняя складывается с $T_{тр}$).

В связи с этим выполнена оценка контактной температуры трения для пар с ТСП ЭОНИТ-3, испытанных в условиях вакуума (табл. 1). Для оценки ресурса пары трения с ТСП суспензионного нанесения по указанному алгоритму использована расчетная зависимость температуры трения $T_{тр}$ (°С) от контактного давления p (МПа) и скорости скольжения v (м/с)

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

Выражение (1) является справедливым для исследованных диапазонов $p = 61...121$ МПа, $v = 0,087...0,504$ м/с и $T_{тр} = 83...144$ °С. Как следует из табл. 1, скорость скольжения $v = 0,25$ м/с входит в указанный диапазон, а контактные дав-

ления $p = 27, 45$ и 58 МПа выходят за пределы, использованные при получении формулы (1). В связи с этим оценку контактной температуры трения для условий трения пары с ТСП ЭОНИТ-3 проводили с корректировкой, графическая интерпретация которой приведена на рис. 3.

На первом этапе корректировки строили зависимость $T_{тр} = f(v)$ для условий основного уровня по контактного давления $p = 91$ МПа с целью расчета ординаты точки (т.) E , соответствующей скорости скольжения $v = 0,25$ м/с на кривой *КВЕЛ*, изображенной на рис. 4, которая адекватно (коэффициент детерминации $R^2 = 1$) описывается уравнением

$$T_{тр} = -282,19v^2 + 291,64T_{тр}v + 61,823.$$

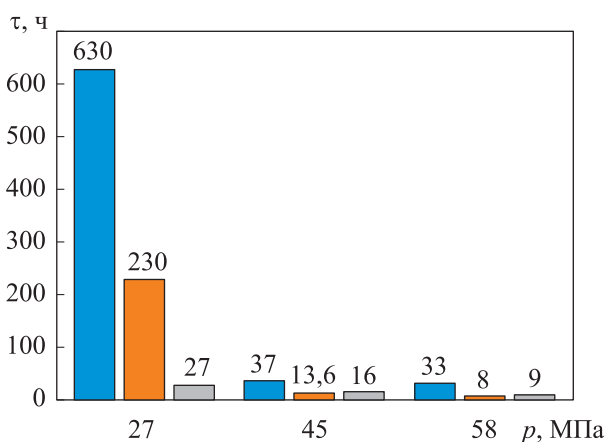


Рис. 2. Зависимости ресурса τ пар трения с ТСП ЭОНИТ-3 от контактного давления p в условиях вакуума при температуре испытаний $T = 20$ (■), 250 (■) и 400 °С (■)

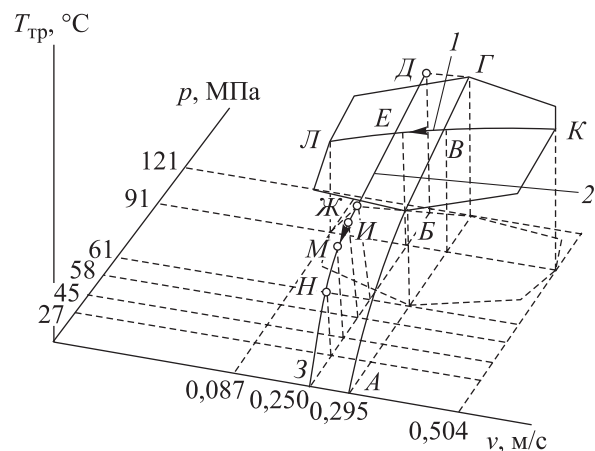


Рис. 3. Графическая интерпретация первого (1) и второго (2) этапов корректировки при оценке поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для условий триботехнических испытаний пары трения с ТСП ЭОНИТ-3

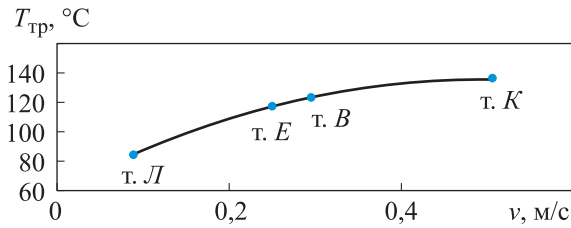


Рис. 4. Результаты первого этапа корректировки поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для пар с ТСП ЭОНИТ-3:

• — данные расчета для построения кривой КВЕЛ (—)

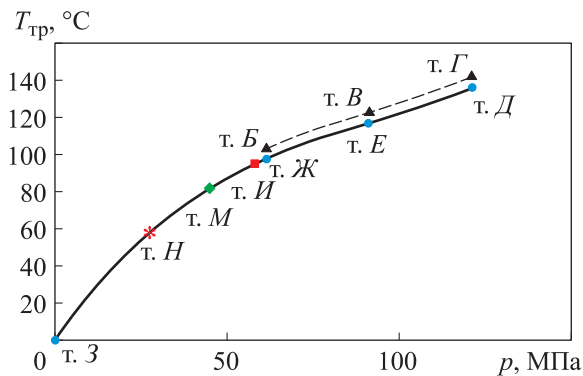


Рис. 5. Результаты второго этапа корректировки поверхностной температуры трения $T_{тр}$ для пары с ТСП ЭОНИТ-3:

▲ и • — данные расчета для построения кривой БВГ (---) и полиномиальной кривой ДЕЖЗ (—);
*, ◆ и ■ — $T_{тр}$ в т. Н, М и И

На втором этапе корректировки строили кривую БВГ с расчетом температуры в т. В, которая составила 123,3 °С. Затем определяли разницу температур в т. В (из уравнения кривой КВЕЛ) и т. Е, на которую корректировали координаты т. Ж, и строили кривую ДЕЖЗ (рис. 5). Далее с учетом т. З, соответствующей контактному давлению, равному нулю, строили кривую ДЕЖЗ, адекватно описываемую уравнением

$$T_{тр} = 9 \cdot 10^{-5} p - 0,0238 p^2 + 2,73 p + 5 \cdot 10^{-11}. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) вычисляли поверхностные температуры трения в точках Н, М и И, соответствующие условиям трения пар для опытов № 7, 8 и 9 (см. табл. 1), которые составили 58,1, 82,9 и 95,8 °С.

С учетом того, что результаты измерения температуры испытаний, приведенные в табл. 1, соответствовали объемной температуре нагрева вакуумной камеры, за температуру функционирования пары трения с ТСП приняли суммарную температуру

$$T_{\Sigma} = T_{тр} + T_{об}. \quad (3)$$

Таблица 2

Результаты триботехнических испытаний пар трения с отечественными ТСП разного типа по схеме вал — втулка в условиях вакуума при $N = 1$ Н, $v = 0,5$ м/с и $T = 20$ °С

Тип ТСП	Марка стали втулки	Ресурс τ		Коэффициент трения $f_{тр}$
		ч	мин	
ВНИИ НП-504	20Х13	6	360	0,140
ВНИИ НП-212	95Х18	240	14 400	0,060
ВНИИ НП-213	20Х13	4	240	0,070
ЭОНИТ-3	95Х18	320	19 200	0,060
ВНИИ НП-230	20Х13	32	1920	0,115

Испытания при нормальной температуре 20 °С (см. табл. 1, опыты № 1–3) по температурным условиям соответствовали экспериментам, по результатам которых была получена зависимость (1) при триботехнических испытаниях в вакуумной камере без нагрева [10]. Поэтому для нормальных условий суммарную температуру трения T_{Σ} приняли равной $T_{тр}$.

Чтобы получить термокорреляционную зависимость типа $\tau = f(T_{тр})$ для ТСП ЭОНИТ-3, выполнена оценка $T_{тр}$ в наиболее широком диапазоне контактной температуры трения для условий, приведенных в работе [11]. Результаты этих триботехнических испытаний пар трения с отечественными ТСП разного типа по схеме вал — втулка в условиях вакуума (10^{-4} мм рт. ст.) при контактной нагрузке $N = 1$ Н, скорости скольжения $v = 0,5$ м/с и температуре испытаний $T = 20$ °С приведены в табл. 2.

Как следует из таблицы, наибольшим ресурсом обладают ТСП ЭОНИТ-3 и ВНИИ НП-212. С учетом того, что результаты для ТСП ЭОНИТ-3 получены по схеме вал — втулка вращательного движения, для фрикционной пары трения выбраны размеры $\varnothing 16 \times \varnothing 8 \times 8$ мм, которые соответствуют условиям испытаний на машине трения ВВТ-1, описанной в работе [12].

Расчет контактного давления проводили по формуле, рекомендованной в работе [11]:

$$p = 0,8 \sqrt{\frac{N D - d}{K D d}}.$$

Здесь D и d — диаметры втулки и вала; K — упругая постоянная в случае контакта двух деформируемых тел

$$K = K_1 + K_2; \quad K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}; \quad K_2 = \frac{1-\mu_2^2}{E_2},$$

где μ_1 , μ_2 и E_1 , E_2 — коэффициенты Пуассона и модули упругости первого и второго тела соответственно, для стали 20Х13 $E_1 = E_2 = 2,18 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$.

Согласно литературным данным, для антифрикционных материалов подшипников скольжения сухого трения рекомендована ходовая посадка второго класса точности [13], соответствующая максимальному диаметру отверстия втулки $D = 8,016$ мм и минимальному диаметру вала $d = 8,973$ мм. В результате расчетов для нормальной нагрузки $N = 1$ Н контактное давление p составило 2,54 МПа при скорости скольжения $v = 0,5$ м/с.

Анализ возможности использования формулы (1) для расчета температуры $T_{тр}$ показал, что контактное давление $p = 2,54$ МПа выходит за границы исследованного диапазона ($p = 23,1 \dots 133,7$ МПа), а скорость скольжения входит в него ($v = 0,096 \dots 1,224$ м/с).

В связи с этим выполнен пересчет средней поверхностной температуры трения в условиях трения пар согласно работе Н.А. Цеева, [11] по описанной методике (см. рис. 2). Расчетная контактная температура трения составила 20,5 °С.

С учетом зависимости (3) получены экспериментально-расчетные результаты испытаний пары трения с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума, приведенные в табл. 3.

Для сравнительной оценки ресурсов ТСП ЭОНИТ-3 и широко используемого ТСП ВНИИ НП-212 применена ранее полученная в условиях вакуума зависимость ресурса от контактной температуры трения для диапазона $T_{тр} = 12 \dots 144$ °С [9], дополненная экспериментальными результатами из работы [11], описываемая выражением ($R^2 = 0,7441$)

$$\tau = 17828e^{-0,026T_{тр}}.$$

Чтобы сравнить ресурсы ТСП ЭОНИТ-3 и лучших зарубежных ТСП в условиях вакуума, использованы результаты, приведенные в табл. 4

Таблица 3

Экспериментально-расчетные результаты испытаний пары трения с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума

Номер опыта	Источник данных	p , МПа	v , м/с	τ		$T_{об}$, °С	$T_{тр}$, °С	T_{Σ} , °С	$f_{тр}$
				ч	мин				
1	[1]	27	0,25	630,0	37 800	20	58,1	58,1	0,06
2		45	0,25	37,0	2220	20	82,9	82,9	0,10
3		58	0,25	33,0	1980	20	95,8	95,8	0,04
4		27	0,25	230,0	13 800	250	58,1	308,1	0,06
5		45	0,25	13,6	816	250	82,9	332,9	0,06
6		58	0,25	8,0	480	250	95,8	345,8	0,06
7		27	0,25	27,0	1620	400	58,1	458,1	0,06
8		45	0,25	16,0	960	400	82,9	482,9	0,05
9		58	0,25	9,0	540	400	95,8	495,8	0,04
–	[11]	2,54	0,50	320,0	19 200	20	20,5	20,5	0,06

Таблица 4

Результаты экспериментального определения ресурса пар трения с ТСП на основе MoS₂, нанесенными разными способами в условиях вакуума

Источник данных	Метод нанесения ТСП	p , МПа	v , м/с	$T_{тр}$, °С	τ , мин	$\tau_{расч}$, мин	$f_{тр}$
[14]	Суспензионный	34,7	0,200	55,30	8333	4611,000	0,045
	Магнетронный	47,2	0,200	73,83	2284	2238,436	0,070
[15]	Высокочастотный	20,3	0,166	34,57	10 000	10349,290	0,040
		79,5	0,266	112,00	475	505,174	0,020

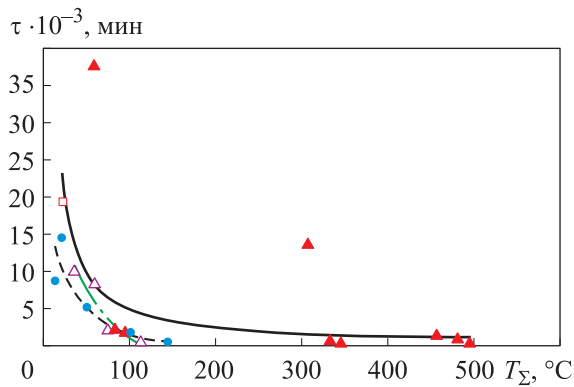


Рис. 6. Зависимости ресурса τ пар трения с различными ТСП от суммарной температуры трения T_{Σ} в условиях вакуума:
 ▲ — данные расчета ТСП ЭОНИТ-3 для построения степенной кривой (—); □ — данные Н.А. Цеева;
 ● — данные расчета ТСП ВНИИ НП-212 для построения экспоненциальной кривой (- -);
 △ — данные расчета ТСП на основе MoS_2 магнетронного и высокочастотного нанесения для построения полиномиальной кривой (- ·)

[14, 15], адекватно описываемые зависимостью ($R^2 = 0,7441$)

$$\tau = 39851e^{-0,0397T_{\text{тр}}}.$$

С учетом всех приведенных результатов построены зависимости ресурса пар трения с ТСП ЭОНИТ-3, ВНИИ НП-212 и зарубежных ТСП на основе MoS_2 магнетронного и высокочастотного нанесения от суммарной температуры трения T_{Σ} (рис. 6).

Термокорреляционная зависимость ресурса пары с ТСП ЭОНИТ-3 от суммарной температуры T_{Σ} приняла вид

$$\tau = 481630T_{\Sigma}^{-1,004}.$$

Как видно из рис. 6, в условиях вакуума во всем исследованном диапазоне температур ресурс пар трения ТСП ЭОНИТ-3 превышает ресурс традиционного отечественного ТСП ВНИИ НП-212 в 2–7 раз, а зарубежных ТСП на основе MoS_2 магнетронного и высокочастотного нанесения в 1,3–8 раз.

При объемной температуре нагрева $T_{\text{об}} = 250 \dots 400$ °C в условиях вакуума ресурс пары трения с ТСП ЭОНИТ-3 снижается до $\tau = 8 \dots 9$ ч.

Сравнительная оценка антифрикционных характеристик пар трения с ТСП ЭОНИТ-3 в условиях вакуума. С использованием экспериментальных данных (см. табл. 3 и 4) построены термокорреляционные зависимости $f_{\text{тр}} = f(T_{\Sigma})$

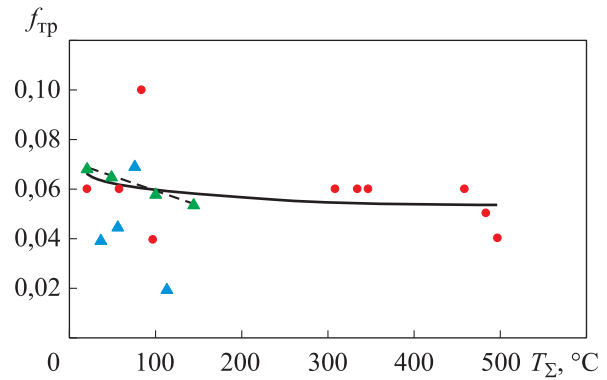


Рис. 7. Термокорреляционные зависимости коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ пар с различными ТСП от суммарной температуры трения T_{Σ} в условиях вакуума:
 ● — данные расчета ТСП ЭОНИТ-3 для построения степенной кривой (—);
 ▲ — данные расчета ТСП ВНИИ НП-212 для построения экспоненциальной кривой (- - -);
 ▲ — данные расчета ТСП на основе MoS_2 суспензионного, магнетронного и высокочастотного нанесения

для ТСП ЭОНИТ-3, ВНИИ НП-212 и зарубежных ТСП суспензионного, магнетронного и высокочастотного нанесения [14, 15], приведенные на рис. 7. Анализируемая термокорреляционная зависимость для пары с ТСП ВНИИ НП-212

$$f_{\text{тр}} = 0,381T_{\text{тр}}^{-0,41}$$

взята из работы [9].

Анализ данных, приведенных на рис. 7, позволяет заключить следующее:

- коэффициент трения пары с ТСП ЭОНИТ-3 при испытаниях в условиях вакуума во всем исследованном диапазоне температур $\Delta T_{\Sigma} = 20 \dots 496$ °C и остается практически неизменным на уровне $f_{\text{тр}} = 0,06$;

- коэффициент трения как традиционных отечественных ТСП ВНИИ НП-212 суспензионного нанесения, так и зарубежных ТСП на основе MoS_2 суспензионного, магнетронного и высокочастотного нанесения в пределах исследованного температурного диапазона составляет $0,02 \dots 0,10$.

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ триботехнических характеристик в условиях вакуума перспективного ТСП ЭОНИТ-3 на основе графита и MoS_2 суспензионного нанесения и отечественных и зарубежных ТСП на основе MoS_2 , нанесенных разными способами.

2. Для пар трения с ТСП ЭОНИТ-3 получены термокорреляционные зависимости ресурса и коэффициента трения от суммарной температуры трения.

3. Показано, что в диапазоне суммарной температуры трения 20...112 °С ресурс ТСП ЭОНИТ-3 превышает ресурс традиционного ТСП ВНИИ НП-212 в 2–7 раз, а зарубежных ТСП на основе MoS₂ магнетронного и высоко-частотного нанесения в 1,3–8 раз.

4. При объемной температуре нагрева 250...400 °С в условиях вакуума ресурс пар трения с ТСП ЭОНИТ-3 снижается до 8...9 ч.

5. Коэффициент трения пары с ТСП ЭОНИТ-3 при триботехнических испытаниях в условиях вакуума в исследованном диапазоне температур трения 20...496 °С остается практически неизменным на уровне 0,06.

Литература

- [1] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, Экспресс, 2010. 604 с.
- [2] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, БГТУ, 2007. 54 с.
- [3] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [4] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press, 1964. 305 p.
- [5] 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)
- [6] 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>
- [7] Dugger M.T., Scharf T.W., Prasad S.V. Materials in space: exploring the effect of low earth orbit on thin film solid lubricants. *Adv. Mater. Process.*, 2014, vol. 172, no. 5, pp. 32–35, doi: <https://doi.org/10.31399/asm.amp.2014-05.p032>
- [8] Броновец М.А. Твердые смазочные покрытия в космической технике. *Тр. XIV Межд. науч.-тех. конф. Трибология — машиностроению*. Москва, 2022, ИМАШ РАН, с. 64–67.
- [9] 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.
- [10] Хопин П.Н. *Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования*. Москва, МАТИ, 2012. 256 с.
- [11] Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. *Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме*. Москва, Машиностроение, 1991. 188 с.
- [12] Духовской Е.А., Ермаков А.Т., Лобашев Б.П. и др. Установка ВВТ-1 для исследования процессов трения материалов в вакууме и разряженных газовых средах при температуре до 1000 °С. В: *Трение и изнашивание при высоких температурах*. Москва, Наука, 1973, с. 5–8.
- [13] Ефимов А.И. *Исследование работоспособности металлофторопластовых подшипников скольжения применительно к машинам легкой и текстильной промышленности*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, ВНИИЛТЕКМАШ, 1971. 16 с.
- [14] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. NASA/TM-1999-209088/Part 1. 30 p.
- [15] Spalvins T. *Lubrication with sputtered MoS₂ films*. NASATM X- 67832. Lewis Research Center, 1971. 16 p.

References

- [1] Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow, Ekopress Publ., 2010. 604 p. (In Russ.).
- [2] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruktivnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Constructive and lubricating materials of space mechanisms]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2007. 54 p. (In Russ.).
- [3] Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. et al. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, vol. 142–144, pp. 67–77, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
- [4] Braithwaite E.R. *Solid lubricants and surfaces*. Pergamon Press, 1964. 305 p.
- [5] 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)
- [6] 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>
- [7] Dugger M.T., Scharf T.W., Prasad S.V. Materials in space: exploring the effect of low earth orbit on thin film solid lubricants. *Adv. Mater. Process.*, 2014, vol. 172, no. 5, pp. 32–35, doi: <https://doi.org/10.31399/asm.amp.2014-05.p032>
- [8] Bronovets M.A. [Hard lubrication coatings in space technology]. *Tr. XIV Mezhd. nauch.-tekh. konf. Tribologiya — mashinostroeniye* [Proc. XIV Int. Sci.-Tech. Conf. Tribology for Mechanical Engineering]. Moscow, 2022, IMASH RAN Publ., pp. 64–67. (In Russ.).
- [9] Khopin P.N. Test analysis of friction couples with solid lubricant coatings under ground-space conditions and prediction of tribological characteristics. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 175–183. (In Russ.). (Eng. version: *J. Frict. Wear*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366618020071>)
- [10] Khopin P.N. *Kompleksnaya otsenka rabotosposobnosti par treniya s tverdosmazochnymi pokrytiami v razlichnykh usloviyakh funktsionirovaniya* [Complex estimation of serviceability of friction pairs with solid-lubricating coatings in different conditions of functioning]. Moscow, MATI Publ., 2012. 256 p. (In Russ.).
- [11] Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. *Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume* [Materials for dry friction nodes working in vacuum]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 188 p. (In Russ.).
- [12] Dukhovskoy E.A., Ermakov A.T., Lobashev B.P. et al. Ustanovka VVT-1 dlya issledovaniya protsessov treniya materialov v vakuume i razryzhennykh gazovykh sredakh pri temperature do 1000 °S [Installation VVT-1 for investigation of friction processes of materials in vacuum and rarefied gas media at temperatures up to 1000 °C]. V: *Trenie i iznashivanie pri vysokikh temperaturakh* [In: Friction and wear at high temperatures]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 5–8. (In Russ.).
- [13] Efimov A.I. *Issledovanie rabotosposobnosti metalloftoroplastovykh podshipnikov skolzheniya primenitelno k mashinam legkoy i tekstilnoy promyshlennosti*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of serviceability of metal-fluoroplastic sliding bearings as applied to machines of light and textile industry. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, VNIILTEKMASH Publ., 1971. 16 p. (In Russ.).
- [14] Miyoshi K., Iwaki M., Gotoh K. et al. *Friction and wear properties of selected solid lubricating films*. NASA/TM-1999-209088/Part 1. 30 p.
- [15] Spalvins T. *Lubrication with sputtered MoS₂ films*. NASATM X- 67832. Lewis Research Center, 1971. 16 p.

Информация об авторах

ХОПИН Петр Николаевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 1205. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

МИШАКОВ Сергей Юрьевич — аспирант кафедры 1202. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, s.mishakov@mail.ru).

Information about the authors

KHOPIN Peter Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department 1205. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: chopinp@mail.ru).

MISHAKOV Sergey Yurievich — Postgraduate, Department 1202. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: s.mishakov@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н., Мишаков С.Ю. Сравнительная оценка триботехнических свойств перспективного твердосмазочного покрытия ЭОНИТ-3, отечественных и зарубежных покрытий для условий вакуума. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 1, с. 123–131.

Please cite this article in English as:

Khopin P.N., Mishakov S.Yu. Comparative assessment of tribotechnical properties of the promising EONIT-3, solid-lubricant coating, domestic and foreign coatings for vacuum conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 1, pp. 123–131.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Навигационные акселерометры»

Автор С.Ф. Коновалов

Изложена теория навигационных акселерометров. Представлены конструктивные схемы акселерометров прямого преобразования и компенсационного типа, включая микромеханические приборы. Исследованы погрешности акселерометров, связанные с несовершенством их электромеханических узлов и электронных блоков.

Рассмотрены стенды и методики, используемые при испытаниях навигационных акселерометров. В приложении подробно описаны конструкция компенсационного акселерометра с кремниевым маятником (типа Si-flex), конструкция и особенности применения технологической оснастки для сборки прибора. В дополнительных материалах, размещенных на сайте кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, приведены: патент на акселерометр Si-flex (КА-400М, КА-800); комплект чертежей акселерометра; комплект чертежей технологической сборочной оснастки.

Для студентов специальностей, связанных с системами навигации и управления движением, также может представлять интерес для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием и исследованием прецизионных электромеханических приборов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

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