

УДК 621.891:519.28

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-84-93

Оценка долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями различных составов отечественного и зарубежного производства

П.Н. Хопин

Московский авиационный институт, 125993, Москва, Российская Федерация, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

An Assessment of the Durability of Friction Couples with Solid Lubricant Coatings of Various Compositions Produced by Domestic and Foreign Manufacturers

P.N. Khopin

Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Russian Federation, A-80, GSP-3, Volokolamskoe Hwy., Bldg. 4

@ e-mail: chopinp@mail.ru

i Исходя из принятой концепции разрушения пар трения с суспензионными твердосмазочными покрытиями вследствие термофлуктуационной деструкции связующих, сделан вывод о целесообразности оценки ресурса пар трения указанного типа с помощью долговечности. Разработан алгоритм ее оценки на основе использования универсальных корреляционных зависимостей температуры трения от нагрузочно-скоростных параметров работы узла и термокорреляционных зависимостей долговечности от температуры трения для твердосмазочных покрытий различных составов. Получены соответствующие зависимости, позволяющие реализовать предложенный алгоритм. Для проведения сравнительной оценки ресурса твердосмазочных покрытий отечественного и зарубежного производства определены основные контактные характеристики и температура трения пары трения скольжения с твердосмазочными покрытиями типа Molykote для условий испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714) по схеме трения скольжения брусок-кольцо. Оценка значений долговечности пары трения с твердосмазочными покрытиями российского производства и Molykote 3400 A показала их удовлетворительное совпадение (отклонение составило 10,5 %).

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, оценка долговечности, нормальные атмосферные условия, трение скольжения

i Based on the conventional concept of destruction of friction couples with suspension-type solid lubricant coatings due to thermo-fluctuation destruction of the binders, a conclusion is drawn on the expediency of an assessment of the working life of friction couples of the specified type using the durability parameter. An algorithm of assessment is developed based on the universal correlation dependences of the temperature of friction on the load-velocity parameters of the assembly and on the thermo-correlation dependences of durability on the temperature of friction for solid lubricant coatings of various compositions. Corresponding dependences are obtained that can be used in the proposed algorithm. To perform a comparative assessment of the working life of domestic and foreign-made solid lubricant coatings, main contact characteristics and the temperature of friction are determined

for a sliding couple with Molykote solid lubricant coatings for testing on the LFW-1 (ASTMD-2714) friction machine using the ‘bar–ring’ sliding scheme. The assessment of the durability of the friction couple with solid lubricant coatings Molykote 3400 A and those of Russian production has shown satisfactory agreement, with deviation being 10.5 %.

Keywords: solid lubricant coatings, durability assessment, normal atmospheric conditions, sliding friction

Для современных узлов трения, автономно функционирующих в условиях нормальной атмосферы, вакуума, при повышенных и пониженных температурах, контактных давлениях вплоть до предела текучести материала основы широко применяют твердосмазочные покрытия (ТСП) типа ВНИИ НП, Molykote и др. [1–4].

Узлы трения механизмов с применением ТСП работают при различном сочетании контактного давления p , скорости скольжения v и температуры T . Расчет триботехнических характеристик ТСП часто затруднен вследствие отсутствия комплексных зависимостей, позволяющих при произвольном сочетании указанных факторов оценивать ресурс и антифрикционные характеристики узлов трения.

Цель работы — разработка методики оценки триботехнических характеристик пар трения с ТСП различных составов отечественного и зарубежного производства.

Методы исследований. Проведенными ранее исследованиями топографии поверхности трения ТСП ВНИИ НП-212 (методами растровой электронной микроскопии, профилометрования, элементного микроанализа) [5, 6] определены функции отдельных компонентов композиционного ТСП и выявлено, что ресурс работы ТСП определяется долговечностью связующего, для оценки которого предложено использовать модернизированную формулу С.Н. Журкова [5, 7]

$$\tau = \tau_0 e^{U_0/(kT)},$$

где τ — время до начала разрушения (долговечность), с; τ_0 — усредненное время между отдельными флуктуациями, с; U_0 — энергия активации разрушения, ккал/моль; k — константа Больцмана; T — абсолютная температура, К.

Разработана методика оценки долговечности [6] и коэффициента трения [8] и получены математические модели, позволяющие с достаточной для практики точностью вычислять долговечность, коэффициент и температуру трения узлов с ТСП для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных режимов функционирования.

Результаты. Разработка методики оценки долговечности пар трения с ТСП. Анализ результатов экспериментальных исследований [9] как при нормальной, так и при повышенной температуре выявил определяющее влияние температурного фактора на долговечность пар трения с ТСП ВНИИ НП-212 (рис. 1).

Так как температура трения $T_{тр}$ является функцией двух основных эксплуатационных факторов — контактного давления p и скорости скольжения v — для расчета долговечности пар трения с ТСП необходимо иметь зависимость, позволяющую оценивать температуру $T_{тр}$ для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров реальных узлов трения с ТСП, т. е. $T_{тр} = f(p, v)$. Зная эту зависимость, алгоритм расчета долговечности пар трения с ТСП можно записать в виде, представленном на рис. 2 [10].

Для оценки ресурса фрикционных сопряжений с ТСП по предложенной методике проведены эксперименты с использованием метода центрального композиционного ротатбельного равномер-планирования второго порядка и получены математические модели

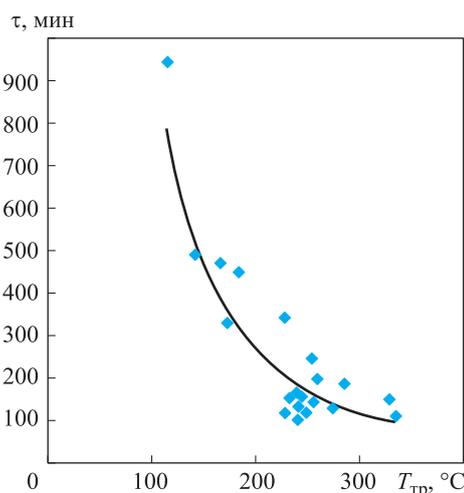


Рис. 1. Экспериментальная зависимость долговечности τ пары трения с ТСП ВНИИ НП-212 от температуры трения $T_{тр}$ (при различных p , v и температуре нагрева):
 ◆ — результаты эксперимента;
 — — аппроксимирующая кривая



Рис. 2. Алгоритм расчета долговечности пары трения с композиционными ТСП, содержащими связующие вещества

Таблица 1

Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ для различных схем трения, типов ТСП и диапазонов варьирования факторов в нормальных атмосферных условиях

Тип ТСП на основе MoS ₂	Схема трения	Диапазоны варьирования		Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$, °C
		N, Н (p, МПа)	v, м/с	
ВНИИ НП-212	Роликовая (модернизированная машина трения РП)	236...1 337 (23,1...133,7)	0,096...1,224	$T_{тр} = 36,49 + 132,23v + 0,535p + 0,234pv - 47,94v^2 - 2,094 \cdot 10^{-3}p^2$
ВНИИ НП-212	Роликовая (машина трения СМТ)	210...1 790 (12,2...103,5)	1,472...3,728	$T_{тр} = 119,35 + 10,26v + 0,065p + 0,335pv$
Molykote 7409	Торцевая (стенд шайба-диск)	755...9 045 (5,60...67,2)	0,11...0,25	$T_{тр} = 67,27 - 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,011p^2$

Примечание. N — контактная нагрузка.

Таблица 2

Термокорреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр})$ для наиболее часто используемых составов суспензионных ТСП российского производства в нормальных атмосферных условиях

Состав ТСП		Корреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр})$, τ , мин; $T_{тр}$, °C
Наполнитель	Связующее	
MoS ₂	Мочевино-формальдегидная смола	$\tau = 9 \cdot 10^6 T_{тр}^{-1,969}$
Графит	Кремнийорганическая смола К-55	$\tau = 4 \cdot 10^{-5} T_{тр}^3 - 0,0276 T_{тр}^2 + 4,88 T_{тр} - 6,67$
MoS ₂	Эпоксидная смола ЭП-96	$\tau = 4493,4 e^{-0,014 T_{тр}}$ (1)
MoS ₂	Неорганическая связка типа Na ₂ SiO ₃	$\tau = -0,0175 T_{тр}^2 + 6,66 T_{тр} - 109,93$
MoS ₂	Кремнийорганическая смола К-55	$\tau = 3414 \cdot e^{-0,01 T_{тр}}$

зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ для различных схем трения, типов ТСП и диапазонов варьирования факторов в нормальных атмосферных условиях (табл. 1).

На следующем этапе решалась задача определения термокорреляционных зависимостей типа $\tau = f(T_{тр})$ для ТСП различных составов в целях широкого использования методики на практике.

В результате обработки экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, для пар трения с ТСП ВНИИ НП-212 получена термокорреляционная зависимость

$$\tau = 9 \cdot 10^6 T_{тр}^{-1,969},$$

где долговечность τ выражена в мин, а температура трения $T_{тр}$ — в °C.

Анализ литературы показал, что искомые зависимости для других типов ТСП могут быть определены из экспериментальных данных, приведенных в монографии [11], путем математической обработки зависимостей $\tau = f(T_{тр})$ для температур выше 100 °C, при которых образуется эффективная смазочная пленка и коэффициент трения резко снижается до $f_{тр} \cong 0,02 \dots 0,05$. В результате обработки указанных

данных получены термокорреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр})$ для наиболее часто используемых составов суспензионных ТСП российского производства в нормальных атмосферных условиях (табл. 2) [10].

Оценка долговечности пар трения с ТСП различных составов. Задача оценки триботехнических характеристик пар трения с ТСП различных составов решалась с применением термокорреляционных зависимостей. Объектом исследования являлись широко известные ТСП Molykote.

Термокорреляционные зависимости были получены автором для пар трения скольжения, поэтому для оценки работоспособности фрикционных сопряжений с ТСП типа Molykote [12–14] использовались результаты испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714), реализующих трение скольжения по схеме брусок–кольцо (рис. 3) [12–14].

Основные характеристики пары трения скольжения с ТСП для испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714) приведены в табл. 3.

С учетом диапазона варьирования фактора ν для зависимостей $T_{тр} = f(p, \nu)$, приведенных в табл. 1, применительно к паре трения брусок–кольцо для испытаний на машине LFW-1 пригодно выражение

$$T_{тр} = 36,49 + 132,23\nu + 0,535p + 0,234p\nu - 47,94\nu^2 - 2,094 \cdot 10^{-3}p^2. \quad (2)$$

Определим контактное давление p для расчета температуры трения по выражению (2). Для оценки контактного давления использована зависимость, полученная автором в работе [9] после статистической обработки результатов экспериментального исследования влияния эксплуатационных факторов на работоспособность пар трения с ТСП при повышенной температуре с применением центрального композиционного ортогонального плана второго по-

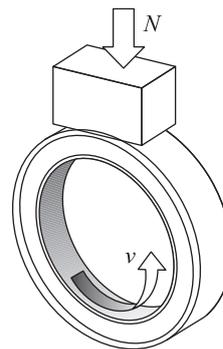


Рис. 3. Схема трения пары брусок–кольцо для машины трения LFW-1 (ASTM D-2714)

рядка, предназначенная для пересчета нагрузки N в контактное давление p :

$$N = 11,44p + 170,88\nu - 161,$$

где p выражено в МПа, ν — в м/с, N — в Н.

Отсюда

$$p = 0,0874N - 14,44\nu + 14,07. \quad (3)$$

Зависимость (3) определена в диапазонах $\nu = 0,174 \dots 1,146$ м/с и $N = 308 \dots 1\,260$ Н для роликовой схемы трения (машины трения РП). Очевидно, что значение контактной нагрузки ($N = 2\,860$ Н) для машины трения LFW-1 (ASTM D-2714) превышает верхнюю границу диапазона для роликовой схемы, более чем в 2 раза по скорости скольжения ($\nu = 0,132$ м/с) т. е. на 24 %.

Анализ зависимости (3) показывает, что ее можно использовать при ориентировочном расчете контактного давления для значений N и ν , превышающих рассмотренные диапазоны. В связи с этим по формуле (3) рассчитано контактное давление для параметров $N = 2\,860$ Н и $\nu = 0,132$ м/с, соответствующих условиям испытаний на машине LFW-1 (ASTM D-2714):

$$p = 0,0874N - 14,44\nu + 14,07 = 262,1 \text{ МПа.}$$

Затем осуществлялась корректировка контактного давления p с учетом изменения схемы трения с роликовой на схему ролик–плоскость

Таблица 3

Основные характеристики пары трения скольжения с ТСП для испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714)

Пара трения			Нагрузка N , Н	Частота вращения, мин ⁻¹	Скорость скольжения ν , м/с
Деталь	Материал	Размеры, мм			
Брусок	SAE 01, HRC 27...33	15,75×10,26×6,35	2 860	72	0,132
Кольцо	SAE 4620, HRC 58...63	∅34,9×8,15			

(тест LFW-1 (ASTM D-2714)). С помощью представленных в работе [15] зависимостей для начального упругого контакта (формул Герца) рассчитаны максимальные значения контактного давления:

- для роликовой схемы трения

$$p_{\max p} = 0,418 \sqrt{2q \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}};$$

- для схемы трения ролик–плоскость

$$p_{\max p\text{-пл}} = 0,418 \sqrt{\frac{2q}{R} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}},$$

где $q = N/b$ – N – контактная нагрузка, b – ширина ролика; E_1, E_2 – модули упругости роликов; R_1, R_2 – радиусы роликов; R – радиус ролика.

Для роликовой схемы $p_{\max p} = 950$ МПа, для схемы ролик–плоскость $p_{\max p\text{-пл}} = 672$ МПа. Таким образом, коэффициент снижения контактного давления при переходе от роликовой схемы к схеме ролик–плоскость

$$K = p_{\max p} / p_{\max p\text{-пл}} = 1,41.$$

С учетом коэффициента $K = 1,41$ контактное давление для машины трения LFW-1 уменьшено в K раз и составило 185,4 МПа. Диапазоны варьирования факторов, использованные при получении зависимости (2): $p = 23,1 \dots 133,7$ МПа и $v = 0,096 \dots 1,224$ м/с.

Очевидно, что давление $p = 185,4$ МПа выходит за пределы диапазона изменения этого фактора для модели (2), а скорость скольжения $v = 0,132$ м/с входит в выделенный диапазон. В связи с этим построена поверхность, соответствующая зависимости (2), для диапазонов основных уровней рассмотренных факторов: $v = 0,26 \dots 1,06$ м/с и $p = 39,1 \dots 117,6$ МПа (рис. 4).

Анализ поверхности, представленной на рис. 4, показывает, что при выходе рассматриваемых параметров за пределы исследованных диапазонов требуется дополнительная корректировка. Вследствие этого построена зависимость $T_{\text{тр}} = f(p)$ для скорости скольжения $v = 0,132$ м/с, соответствующей условиям испытаний на машине трения LFW-1 (рис. 5) в диапазоне давлений от нижней исследованной границы ($p = 39,1$ МПа) до $p = 200$ МПа, включающего в себя искомое давление ($p = 185,4$ МПа).

Очевидно, что температура трения, описываемая полиномом (2), при превышении верхней исследованной границы $p = 117,6$ МПа снижается по параболической зависимости, что не соответствует реальной картине трения, так как с повышением контактного давления $T_{\text{тр}}$ возрастает. Поэтому для аппроксимации использованы точки графика до $p = 117,6$ МПа, которые адекватно описываются выражением

$$T_{\text{тр}} = 15,66 \ln p + 15,64. \quad (4)$$

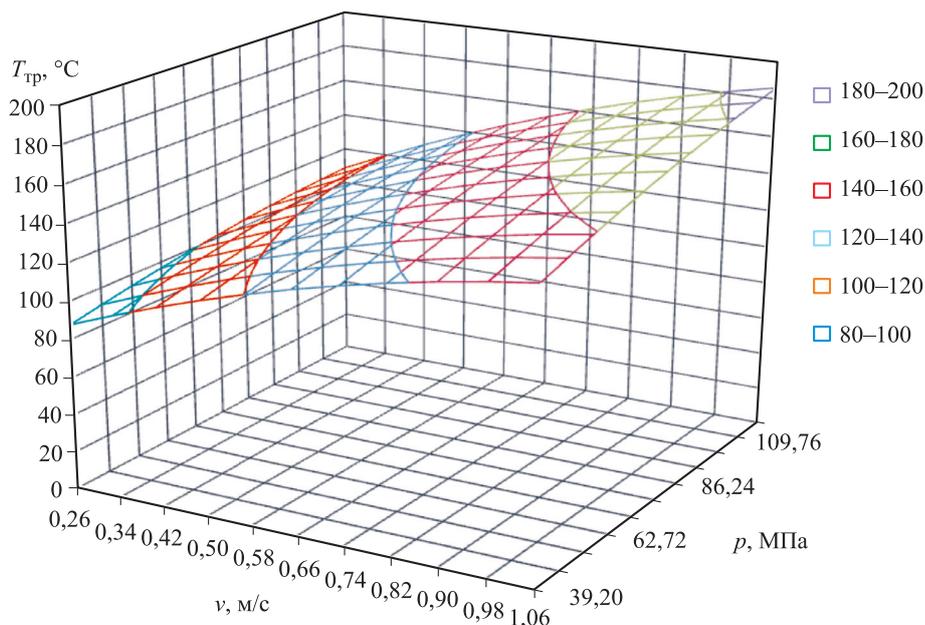


Рис. 4. Графическая интерпретация зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$, полученная при экспериментальном исследовании пары трения с ТСП ВНИИ НП-212

Температура трения, рассчитанная с помощью выражения (4) для давления $p = 185,4$ МПа, составила $97,4$ °С.

Значения долговечности (в оборотах (об.)) пары трения с ТСП Molykote на основе MoS_2 и графита, полученные в результате испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714) при вращении по схеме трения скольжения брусок-кольцо для $N = 2\ 860$ Н и $v = 0,132$ м/с, приведены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает следующее:

- долговечность пар трения с ТСП типа Molykote, приведенная в технической характеристике 2014 г. [14], существенно отличается от данных, представленных в 2008 г. [12]; например, для ТСП D-7620 (7620) ресурс снижается в 20 раз;

- для пар трения с ТСП D 321R и D 3484 имеет место отклонение долговечности от рекомендаций, приведенных в работе [14] (рис. 6), где наибольшая долговечность ТСП обеспечивается на фосфатированных поверх-

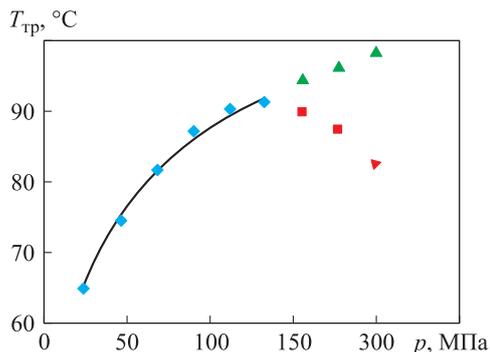


Рис. 5. Зависимость температуры трения $T_{тр}$ от контактного давления p :

◆ — $T_{тр} = f(p)$ для $v = 0,132$ м/с и исследованного диапазона p ; ■ — значения $T_{тр}$ вне исследованного диапазона p , полученные по зависимости $T_{тр} = f(p, v)$; — — логарифмическая зависимость $T_{тр} = f(p)$ для $v = 0,132$ м/с и исследованного диапазона p ; ▲ — значения $T_{тр}$ вне исследованного диапазона p , определенные по логарифмической зависимости

ностях, а наименьшая — без их предварительной обработки;

- для пар трения с ТСП D 3484 наибольшая долговечность получена для поверхности без

Таблица 4

Значения долговечности пары трения скольжения с ТСП Molykote, полученные в результате испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714)

ТСП	Наполнитель	Связка	Долговечность пар трения, об., по данным работы			
			[14]			[12]
			Без предварительной обработки	После фосфатирования	После пескоструйной обработки	После пескоструйной обработки (П) или фосфатирования (Ф)
1	2	3	4	5	6	7
D 321R	MoS_2 (19 %) + графит (4,9 %)	Полибутилтитанат	212 000	146 000	306 000	480 000 (П)
D 3484	MoS_2 (20 %) + графит (5,1 %)	Фенольная	298 000	126 000	149 000	300 000 (Ф)
3400 А (без Pb)	MoS_2 (12 %)	Эпоксидная смола	—	48 000	—	100 000 (Ф)
106	MoS_2 (18 %) + графит (6 %)	Эпоксидная смола	—	187 000	—	380 000 (Ф)
D-7409	MoS_2 (15 %) + графит (1,5 %)	Полиамидимидная	—	—	—	350 000 (Ф)
7400	MoS_2 (13 %) + графит (6,4 %)	Акриловая	—	343 000	—	280 000 (Ф)
D10-GBL, D 10	Графит (15 %)	Полиамидимидная	—	—	—	6 000 (Ф)
3402-С	MoS_2 (10 %)	Специальная (органическая)	—	108 800	74 800	150 000 (П)
D-7620 (7620)	MoS_2 (17 %) + графит (1,8 %)	Полиамидимидная	—	20 000	—	400 000 (Ф)

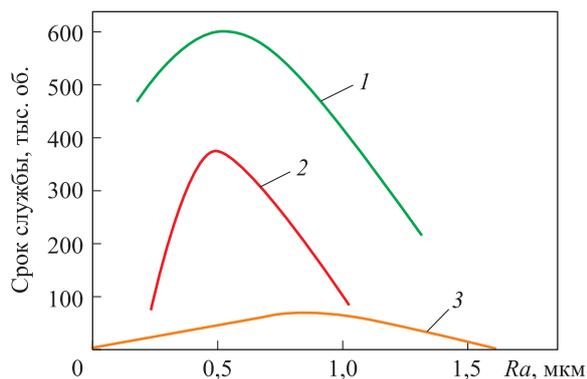


Рис. 6. Зависимость срока службы антифрикционных покрытий от шероховатости поверхности Ra и вида предварительной обработки:

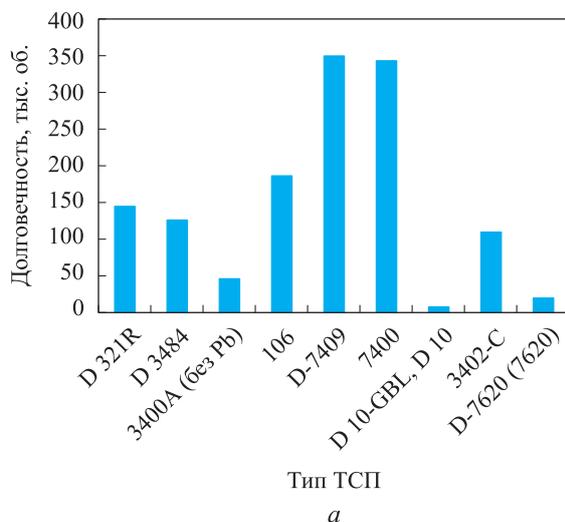
- 1 — пескоструйная обработка и фосфатирование;
2 — пескоструйная обработка; 3 — полированная поверхность

предварительной обработки, что не соответствует данным рис. 6.

На основании данных 2014 г. [14], приведенных в графе 5 табл. 4, с использованием недостающих значений для ТСП D-7409, D10-GBL и D 10 из руководства 2008 г. [12] построена диаграмма, представленная на рис. 7, а. Ее анализ показывает, что наибольшую долговечность обеспечивают два ТСП:

- Molykote D-7409 (MoS_2 (15 %) + графит (1,5 %) с полиамид-имидным связующим);
- Molykote 7400 (MoS_2 (13 %) + графит (6,4 %) с акриловым связующим).

С помощью данных 2008 г. [12], приведенных в графе 7 табл. 4, построена диаграмма (рис. 7, б), из которой следует, что наибольшая долговечность присуща следующим ТСП:



- Molykote D-321R (MoS_2 (19 %) + графит (4,9 %) с полибутил-титанатным связующим);
- Molykote D-7620 (7620) (MoS_2 (17 %) + графит (1,8 %) с полиамид-имидным связующим);
- Molykote 106 (MoS_2 (18 %) + графит (6 %) с эпоксидным связующим);
- Molykote D-7409 (MoS_2 (15 %) + графит (1,5 %) с полиамид-имидным связующим).

Сравнение составов ТСП, для которых автором получены термодолговечностные зависимости (см. табл. 2), и ТСП Molykote (см. табл. 4) выявило полное совпадение составов ТСП Molykote 3400 А и покрытия российского производства, включающего в себя наполнитель MoS_2 и эпоксидную смолу ЭП-96 (см. табл. 2). С учетом частоты вращения кольца в схеме брусок-кольцо $n = 72 \text{ мин}^{-1}$ получим долговечность пар трения с ТСП:

- для данных 2014 г.
 $\tau = 48\,000/72 = 667 \text{ мин.}$
- для данных 2008 г.
 $\tau = 100\,000/72 = 1\,389 \text{ мин.}$

Отсюда среднее значение долговечности $\tau_{\text{ср}} = 1\,028 \text{ мин.}$

Согласно термодолговечностной зависимости (1) из табл. 2, для ТСП российского производства, состоящего из MoS_2 со связующим в виде эпоксидной смолы ЭП-96, расчетная долговечность

$$\tau_{\text{расч}} = 4493,4 \exp(-0,014 \cdot 97,4) = 1\,149 \text{ мин.}$$

Отклонение расчетной долговечности ТСП российского производства от среднего значения $\tau_{\text{ср}}$ ТСП Molykote 3400 А составило 10,5 %,

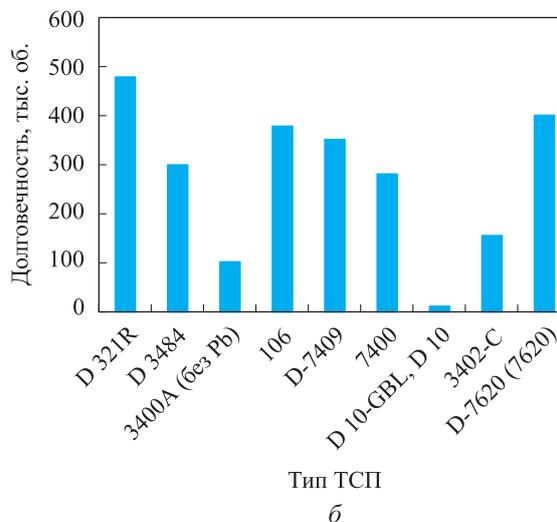


Рис. 7. Долговечность ТСП Molykote при трении скольжения по схеме брусок-кольцо на машине трения LFW-1 по данным 2014 г. (а) и 2008 г. (б)

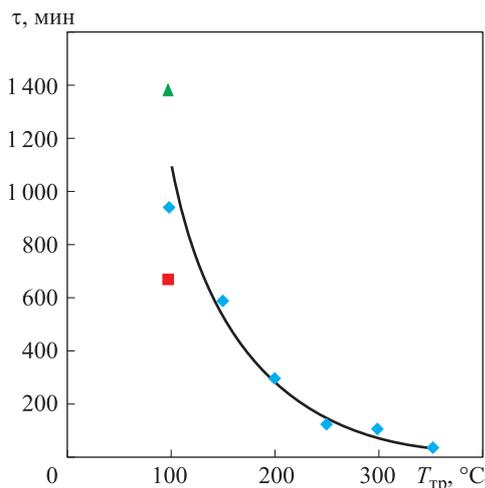


Рис. 8. Термокорреляционная зависимость $\tau = f(T_{тр})$ пары трения с ТСП на основе MoS_2 с эпоксидным связующим ЭП-96 (♦) и значения долговечности ТСП Molykote 3400 А по данным 2014 г. (■) и 2008 г. (▲)

что считается удовлетворительным для расчетов на трение и износ.

Графическая интерпретация расчетных и экспериментальных значений долговечности пары трения с ТСП на основе MoS_2 со связующим в виде эпоксидной смолы приведена на рис. 8.

Выводы

1. Анализ разрушения ТСП с позиции термомодуляционной теории деструкции их связующих позволяет сделать заключение о целесообразности оценки ресурса пар трения с антифрикционными покрытиями указанного типа с помощью долговечности.
2. Предложена методика оценки долговечности пар трения с ТСП суспензионного типа, основанная на последовательном расчете тем-

пературы трения в зависимости от нагрузочно-скоростных параметров работы узла (с использованием универсальных корреляционных зависимостей $T_{тр} = f(p, v)$) и последующем определении ресурса рассматриваемых фрикционных сопряжений (на базе использования термокорреляционных зависимостей долговечности от температуры трения $\tau = f(T_{тр})$) для пар с ТСП различных составов.

3. Для реализации методики получены универсальные зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ применительно к парам трения с ТСП в широком диапазоне варьирования нагрузочно-скоростных факторов, а также рассчитаны термокорреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр})$ в нормальных атмосферных условиях для пар трения с ТСП различных составов.

4. Определены значения контактного давления и температуры трения пары трения скольжения с ТСП типа Molykote для условий испытаний на машине трения LFW-1 (ASTM D-2714) по схеме трения скольжения брусок–кольцо.

5. Проведена оценка долговечности пар трения скольжения (схема трения брусок–кольцо) с ТСП типа Molykote различных составов, полученная в результате испытаний на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 ($N = 2860$ Н, $v = 0,132$ м/с).

6. Выполненная с помощью термокорреляционных зависимостей сравнительная оценка долговечности пары трения с ТСП российского производства, состоящего из MoS_2 (12 %) со связующим в виде эпоксидной смолы ЭП-96, и ТСП Molykote 3400 А для условий испытаний по схеме трения брусок–кольцо на машине трения LFW-1 по ASTM D-2714 ($N = 2860$ Н, $v = 0,132$ м/с) показала их удовлетворительное совпадение (отклонение составило 10,5 %).

Литература

- [1] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. *Прикладная трибология (трение, износ и смазка)*. Москва, ЭкоПресс, 2010. 604 с.
- [2] 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.
- [3] Ярош В.М., Моишеев А.А., Броновец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны. *Трение и износ*, 2003, т. 24, № 6, с. 626–635.
- [4] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарсов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 54 с.
- [5] Хопин П.Н. Оценка долговечности твердосмазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения. *Трение и износ*, 1995, т. 16, № 4, с. 787–793.

- [6] Хопин П.Н. Методика и результаты оценки эксплуатационных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования. *Трение и износ*, 2012, т. 33, № 1, с. 23–31.
- [7] Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердого тела. *Журнал технической физики*, 1953, т. 23, с. 1667–1689.
- [8] 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.
- [9] Хопин П.Н., Попов О.В., Комаров В.А. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочным покрытием в зависимости от температурного фактора. *Трение и износ*, 1985, т. 6, № 6, с. 1109–1116.
- [10] Хопин П.Н. Термокорреляционный подход к оценке работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями для условий нормальной атмосферы. *Трибология — машиностроению. Тез. докл. XI междунар. НТК*, Москва, ИМАШ, 2016, с. 254–255.
- [11] Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. *Твердые дисульфид-молибденовые смазки*. Москва, Химия, 1966. 152 с.
- [12] *Руководство по выбору антифрикционных покрытий Molykote*. URL: http://atf.ru/pdf/manual_choice_AF.pdf.
- [13] Zechel R., Lonsky P., Trautmann H. *Molykote*. Dow Corning GmbH, 1991.
- [14] *Технические описания АФП (ТСП) от 03.10.2016 (для ТСП MOLYKOTE® D-7409) от 04.03.2014 (для остальных ТСП)*. URL: <http://atf.ru/production/category268/>.
- [15] Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев, Наукова Думка, 1988. 736 с.

References

- [1] Drozdov Iu.N., Iudin E.G., Belov A.I. *Prikladnaia tribologiya (trenie, iznos i smazka)* [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow, EkoPress, 2010. 604 p.
- [2] Kovalev E.P., Ignat'ev M.B., Semenov A.P., Smirnov N.I., Nevolin V.N., Fominskii V.Iu. *Tverdosmazochnye pokrytiia dlia mashin i mekhanizmov, rabotaiushchikh v ekstremal'nykh usloviakh (obzor)* [Solid lubricating coatings for machines and mechanisms operating in extreme conditions summary]. *Trenie i iznos* [Journal of Friction and Wear]. 2004, vol. 25, no. 3, pp. 316–336.
- [3] Iarosh V.M., Moisehev A.A., Bronovets M.A. *Issledovanie materialov na trenie i iznos v otкрыtom kosmicheskom prostranstve na orbite vokrug Luny* [Study of friction and wear of materials in the open space in the lunar orbit]. *Trenie i iznos* [Journal of Friction and Wear]. 2003, vol. 24, no. 6, pp. 626–635.
- [4] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarsov V.M. *Konstruksionnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Structural and lubricants for space mechanisms]. Sankt-Petersburg, Balt. gos. tekhn. un-t publ., 2007. 54 p.
- [5] Khopin P.N. *Otsenka dolgovechnosti tverdosmazochnykh pokrytii na osnove analiza topografii poverkhnostei treniia* [Assessment of service life of solid lubricant coatings on the basis of microcontact friction surface]. *Trenie i iznos* [Journal of Friction and Wear]. 1995, vol. 16, no. 4, pp. 787–793.
- [6] Khopin P.N. *Method and results of assessment of the performance of friction pairs with solid lubricating coatings under various operating conditions*. *Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 14–21.
- [7] Zhurkov S.N., Narzullaev B.N. *Vremennaia zavisimost' prochnosti tverdogo tela* [Time dependence of strength of solids]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical physics]. 1953, vol. 23, pp. 1667–1689.
- [8] 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.
- [9] Khopin P.N., Popov O.V., Komarov V.A. *Ekspiermental'naia otsenka rabotosposobnosti par treniia s tverdosmazochnym pokrytiem v zavisimosti ot temperaturnogo faktora* [Experimental evaluation of efficiency of friction pairs with hard lubricant coating depending on

- the temperature factor]. *Trenie i iznos* [Journal of Friction and Wear]. 1985, vol. 6, no. 6, pp. 1109–1116.
- [10] Khopin P.N. Termokorreliatsionnyi podkhod k otsenke rabotosposobnosti par treniia s tverdosmazochnymi pokrytiiami dlia uslovii normal'noi atmosfery [Thermochronology approach to the evaluation of performance of friction pairs with hard lubricant coatings for conditions normal atmosphere]. *Tribologiya — mashinostroeniuiu. Tez. dokl. 11 mezhdunar. NTK* [Tribology — engineering. Abstracts of the 11 international scientific-technical conferences]. Moscow, IMASh publ., 2016, pp. 254–255.
- [11] Sentiurikhina L.N., Oparina E.M. *Tverdye disul'fid — molibdenovye smazki* [A rigid disulfide — molybdenum grease]. Moscow, Khimiia publ., 1966. 152 p.
- [12] *Rukovodstvo po vyboru antifriktsionnykh pokrytii Molykote* [Selection guide anti-friction coatings Molykote]. Available at: http://atf.ru/pdf/manual_choice_AF.pdf.
- [13] Zechel R., Lonsky P., Trautmann H. *Molykote*. Dow Corning GmbH, 1991.
- [14] *Tekhnicheskie opisaniia AFP (TSP) ot 03.10.2016 (dlia TSP MOLYKOTE® D-7409) ot 04.03.2014 (dlia ostal'nykh TSP)* [Technical description of AFP (TSP) from 03.10.2016 (TSP MOLYKOTE® D-7409) from 04.03.2014 (for the rest of TSP)]. Available at: <http://atf.ru/production/category268/>.
- [15] Pisarenko G.S., Iakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniiu materialov* [Handbook on strength of materials]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1988. 736 p.

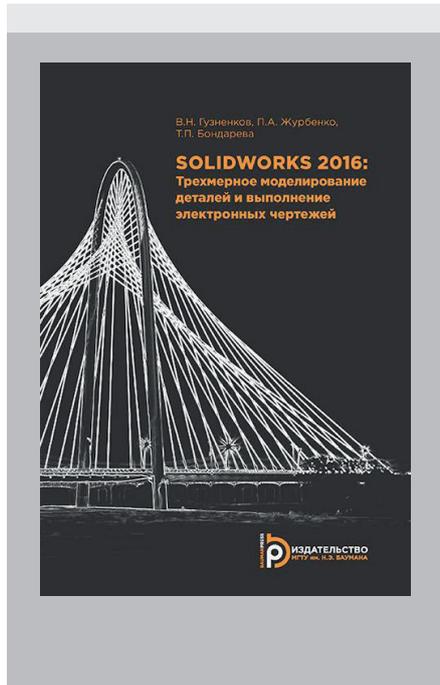
Статья поступила в редакцию 10.11.2017

Информация об авторе

ХОПИН Петр Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов». МАИ (125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopin@mail.ru).

Information about the author

KHOPIN Petr Nikolaevich (Moscow) — Candidate 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: chopin@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
В.Н. Гузенкова, П.А. Журбенко, Т.П. Бондаревой
**«SolidWorks 2016. Трехмерное моделирование
деталей и выполнение электронных чертежей»**

Рассмотрены вопросы, связанные с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks в курсе «Инженерная графика»: построение электронных геометрических моделей и выполнение электронных чертежей деталей.

Издание подготовлено с учетом требований государственных стандартов Единой системы конструкторской документации на основе опыта преподавания дисциплины «Компьютерная графика» на кафедре «Инженерная графика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших технических учебных заведений.

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