

УДК 621.891:519.28

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-47-55

# Сравнительная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями зарубежного производства при скользящем и реверсивном движениях

П.Н. Хопин, Е.А. Трунова

МАИ, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4

## A Comparative Assessment of Efficiency of Foreign-Made Friction Pairs with Solid Lubricant Coating when in Sliding and Reverse Motion

P.N. Khopin, E.A. Trunova

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

@ e-mail: chopin@mail.ru, lew1967@mail.ru

**i** Проанализированы результаты испытаний фрикционных сопряжений с твердосмазочными покрытиями Molykote для условий реверсивного движения. Предложена методика оценки долговечности таких пар трения. По данным 2008 г., долговечность сопряжений с твердосмазочными покрытиями компании Molykote при реверсе оказалась меньше, чем при трении скольжения для различных нагрузочно-скоростных условий трения согласно ASTM 2714 (тест LFW-1). По данным исследований 2014 г., для ряда таких пар трения указанный параметр при реверсе оказался в 2,2 раза больше, чем при трении скольжения. Исходя из предложенной автором термофлуктуационной теории трения пар с твердосмазочными покрытиями, рекомендовано оценивать ресурс работы таких пар для реверсивного движения с использованием заранее вычисленных коэффициентов снижения долговечности по отношению к трению скольжения для одинаковых температурных режимов трения при реверсе и скольжении. Проведенный расчет для сопряжения с твердосмазочными покрытиями на основе MoS<sub>2</sub> с эпоксидным связующим позволил оценить коэффициент снижения долговечности, составивший 1,72.

**Ключевые слова:** твердосмазочные покрытия, оценка долговечности, реверсивное трение, трение скольжения

**i** This paper presents an analysis of testing friction pairs with Molykote solid lubricant coatings for the conditions of reverse motion. A technique for assessing the durability of such friction pairs is proposed. Based on the 2008 data, the durability of couplings with Molykote solid lubricant coatings turned out to be lower in the reverse motion compared to the sliding motion for various load and speed conditions of friction according to ASTM 2714 (test LFW-1). According to the 2014 studies, for a number of such coupling, the specified parameter turned out to be 2.2 higher in reverse than in sliding motion. Based on the thermofluctuation theory developed by the authors for friction pairs with solid lubricant coatings, it is recommended to estimate operational life of such pairs in reverse motion using pre-calculated coefficients of durability reduction with regards to sliding friction for identical

temperature conditions of the reverse and sliding motion. The calculation of conjugation with solid lubricant coatings based on MoS<sub>2</sub> with epoxy binding allowed the authors to estimate the coefficient of durability reduction as 1.72.

**Keywords:** solid lubricant coatings, durability assessment, reverse friction, sliding friction

Большинство узлов трения с применением твердосмазочных покрытий (ТСП) функционирует в условиях возвратно-вращательного (реверсивного) и возвратно-поступательного движений [1–8], поэтому прогнозирование ресурса работы таких сопряжений является актуальной задачей.

Цель работы — разработка методики оценки долговечности сопряжений с ТСП, функционирующими в условиях реверсивного движения (РД).

**Методы исследований.** Анализ литературных источников показал, что в число основных трибологических характеристик пар трения с ТСП, приведенных на сайте компании Molykote [9], входит долговечность пар трения с ТСП, полученная согласно ASTM D-2714 (тест LFW-1) при однонаправленном скользящем движении (СД) и РД. Для оценки влияния реверсивности движения фрикционных сопряжений на долговечность пар трения проведено сравнение указанных параметров, представленных на сайте компании Molykote [9, 10].

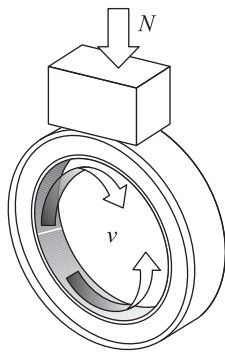


Рис. 1. Схема трения пары брусок — кольцо на машине трения LFW-1 (согласно ASTM D-2714) при СД и РД

Схема испытаний для обоих типов движения приведена на рис. 1, где  $N$  — нагрузка;  $v$  — скорость скольжения или скорость РД.

Основные характеристики пары трения с ТСП при СД и РД для испытаний на машине трения LFW-1 (согласно ASTM D-2714) приведены в табл. 1, где  $N_{ск}$  и  $N_{рев}$  — нагрузка при СД и РД;  $\omega_{ск}$  — частота вращения кольца при СД;  $\omega_{рев}$  — частота колебаний пары трения при РД.

С учетом геометрических параметров контактирующих элементов схемы трения брусок — кольцо (см. табл. 1) расчетные значения скорости скольжения при СД составили 0,132 м/с, при РД — 0,082 м/с.

**Результаты. Анализ долговечности пар трения с ТСП Molykote при СД и РД.** Значения долговечности пар трения с ТСП Molykote различных составов, полученные в результате испытаний по схеме брусок — кольцо на машине трения LFW-1 (согласно ASTM D-2714) при СД ( $N_{ск} = 2860$  Н,  $v_{ск} = 0,132$  м/с) и РД ( $N_{рев} = 900$  Н,  $v_{рев} = 0,082$  м/с), приведены в табл. 2, где значения числа оборотов при СД и циклов при РД пересчитаны и представлены в виде долговечности  $\tau$  (мин) [10].

С использованием данных табл. 2 построена диаграмма (рис. 2), где значения долговечности пар трения с ТСП 3402-С взяты для предварительной обработки пескоструйным методом, а значения числа циклов для ТСП D-7409 не учтены (так как в таблице приведены результаты только для РД).

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 2, позволяет заключить следующее:

- наибольшую долговечность при РД имеют ТСП Molykote 106 с эпоксидным связующим ( $\tau = 4570$  мин) и D-321R с полибутил-титанатным неорганическим связующим ( $\tau = 4470$  мин);

Таблица 1

Основные характеристики пары трения с ТСП при СД и РД для испытаний на машине трения LFW-1

Пара трения			Нагрузка, Н		Частота	
Элемент	Материал	Размеры, мм	$N_{ск}$	$N_{рев}$	$\omega_{ск}$ , мин <sup>-1</sup>	$\omega_{рев}$ , циклов/мин
Брусок	SAE 01, HRC 27-33	15,75×10,26×6,35	2860	900	72,0	89,5
Кольцо	SAE 4620, HRC 58-63	Ø34,9×8,15				

Таблица 2

Значения долговечности пар трения с ТСП Molykote различных типов при СД и РД по данным 2014 г.

Тип ТСП	Наполнитель	Связка	Долговечность, мин	
			после фосфатирования	после пескоструйной обработки
106	MoS <sub>2</sub> (18 %) + графит (6 %)	Эпоксидная смола	2600,0/4570,0	–
D-106	MoS <sub>2</sub> (16 %) + графит (4,9 %)	Эпоксидная смола	403,0/994,0	–
3402-С	MoS <sub>2</sub> (10 %)	Специальная (органическая)	–	625,0/279,0
3402-С (без Pb)	MoS <sub>2</sub>	Органическая	1500,0/1460,0	–
7405	Синтетическая твердая смазка	Органическая	875,0/44,7	–
D-7405	Синтетическая твердая смазка	Полиамид-имидная	1215,0/95,0	–
3400А	MoS <sub>2</sub> (12 %)	Эпоксидная смола	1181,0/470,0	–
3400А (без Pb)	MoS <sub>2</sub> (12 %)	Эпоксидная смола	667,0/559,0	–
7409	MoS <sub>2</sub> (15 %) + графит (1,5 %)	Полиамид-имидная	5056,0/2391,0	–
D-3484	MoS <sub>2</sub> (20 %) + графит (5,1 %)	Фенольная	1750,0/2737,0	–
7400	MoS <sub>2</sub> (13 %) + графит (6,4 %)	Акриловая	4764,0/849,0	–
7620	MoS <sub>2</sub> (17 %) + графит (1,8 %)	Полиамид-имидная	181,0/223,0	–
D-7620	MoS <sub>2</sub> (18 %) + графит (2 %)	Полиамид-имидная	278,0/637,0	–
D-10	Графит (15 %)	Полиамид-имидная	76,4/11,2	–
D-321R	MoS <sub>2</sub> (19 %) + графит (4,9 %)	Полибутил-титанат	–	2028,0/4470,0

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для СД, в знаменателе — для РД.

причем долговечность этих ТСП при РД существенно выше, чем при СД (соответственно в 1,76 и 2,2 раза);

- у ТСП D-106 (с эпоксидным связующим), D-3484 (с фенольным связующим), 7620 и D-7620 (с полиамид-имидным связующим) и D-321R (с полибутил-титанатным неорганическим связующим) также долговечность при РД больше, чем при СД;

- у остальных ТСП долговечность при РД меньше, чем при СД.

Для проверки указанных результатов проведено их сравнение с данными 2008 г. [11]. Значения долговечности пар трения с ТСП Molykote, полученные по данным 2008 г. [11] в результате испытаний по схеме брусок — кольцо на машине трения LFW-1 (согласно ASTM D-2714) при СД ( $N_{ск} = 2860$  Н,  $v_{ск} = 0,132$  м/с) и РД ( $N_{рев} = 900$  Н,  $v_{рев} = 0,082$  м/с), приведены в табл. 3.

С использованием данных табл. 3 построена диаграмма (рис. 3), где значения долговечности

пар трения с ТСП Molykote 3402-С и D-321R взяты для предварительной обработки пескоструйным методом.

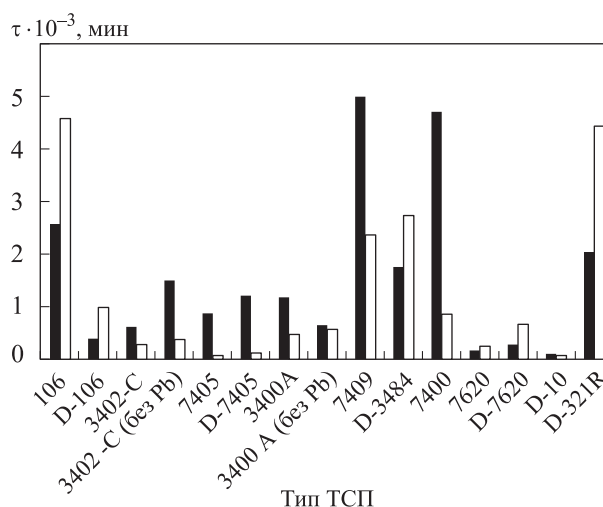


Рис. 2. Значения долговечности пар трения для различных типов ТСП Molykote при СД (■) и РД (□) по данным 2014 г.

Таблица 3

Значения долговечности пар трения с ТСП Molykote различных типов при СД и РД по данным 2008 г.

Тип ТСП	Наполнитель	Связка	Долговечность, мин	
			после фосфатирования	после пескоструйной обработки
106	MoS <sub>2</sub> (18 %) + графит (6 %)	Эпоксидная смола	5278,0/3130,0	–
D-106	MoS <sub>2</sub> (16 %) + графит (4,9 %)	Эпоксидная смола	4167,0/2011,0	–
3402-C	MoS <sub>2</sub> (10 %)	Специальная (органическая)	–	2083,0/168,0
7405	Синтетическая твердая смазка	Органическая	2083,0/1117,0	–
3400A (без Pb)	MoS <sub>2</sub> (12 %)	Эпоксидная смола	1389,0/559,0	–
7409	MoS <sub>2</sub> (15 %) + графит (1,5 %)	Полиамид-имидная	4861,0/1117,0	–
D-3484	MoS <sub>2</sub> (20 %) + графит (5,1 %)	Фенольная	4167,0/3911,0	–
7400	MoS <sub>2</sub> (13 %) + графит (6,4 %)	Акриловая	2778,0/1117,0	–
7620	MoS <sub>2</sub> (17 %) + графит (1,8 %)	Полиамид-имидная	5556,0/1117,0	–
D-10	Графит (15 %)	Полиамид-имидная	83,3/11,1	–
D-321R	MoS <sub>2</sub> (19 %) + графит (4,9 %)	Полибутил-титанат	–	6667,0/2346,0

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для СД, в знаменателе — для РД.

Анализ данных, приведенных в табл. 3 и на рис. 3, свидетельствует о следующем:

- у всех типов ТСП Molykote долговечность при РД меньше, чем при СД;
- наибольшую долговечность при РД имеют ТСП D-3484 с фенольным связующим ( $\tau = 3911$  мин) и ТСП 106 с эпоксидным связующим ( $\tau = 3130$  мин).

Для оценки степени снижения долговечности при РД  $\tau_{рев}$  по сравнению с таковой при СД  $\tau_{ск}$  использован коэффициент снижения долговечности

$$K = \frac{\tau_{ск}}{\tau_{рев}}. \quad (1)$$

Значения коэффициентов снижения долговечности для ТСП Molykote при СД ( $N_{ск} = 2860$  Н,  $v_{ск} = 0,132$  м/с) относительно  $\tau_{рев}$  при РД ( $N_{рев} = 900$  Н,  $v_{рев} = 0,082$  м/с), рассчитанные с использованием данных компании Molykote 2014 г. [10] и 2008 г. [11], приведены в табл. 4.

Анализ коэффициентов снижения долговечности, приведенных в табл. 4, показывает, что их значения по данным 2014 г. и 2008 г. существенно различаются. Если по данным 2014 г. у ТСП Molykote 106, D-106, D-3484, 7620 и D-321R долговечность при РД была больше, чем при СД, то по данным 2008 г. наоборот. Значения  $K$  изменялись в диапазоне 1,07... 19,6.

**Оценка долговечности пар трения с ТСП при реверсивном и скользящем трении.** Исходя из предложенной автором термофлуктуационной теории разрушения ТСП вследствие деструкции связующих составляющих рассматриваемых покрытий [12], целесообразно оценивать долговечность пар трения с ТСП для различных видов трения (в данном случае для скользящего и реверсивного) в одинаковом температурном состоянии контактирующих поверхностей.

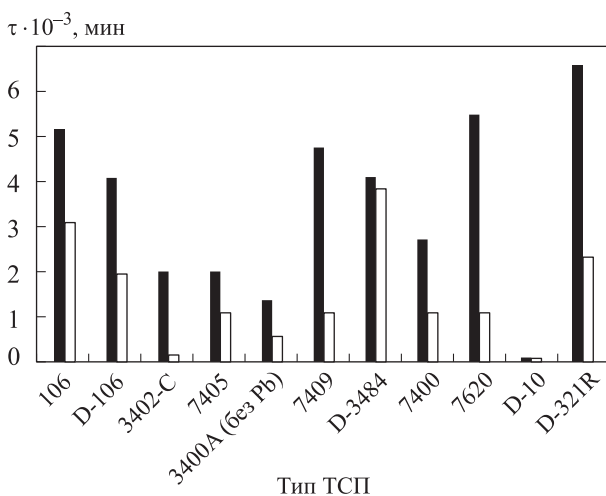


Рис. 3. Значения долговечности пар трения с ТСП Molykote при СД (■) и РД (□) по данным 2008 г.

Таблица 4

Значения коэффициентов снижения долговечности для ТСП Molykote, рассчитанные с использованием данных 2014 г. и 2008 г.

Тип ТСП	К		Тип ТСП	К		Тип ТСП	К	
	2014 г.	2008 г.		2014 г.	2008 г.		2014 г.	2008 г.
106	0,568	1,690	D-7405	12,80	–	7400	5,610	2,490
D-106	0,405	2,070	3400A	2,520	–	7620	0,808	4,970
3402-C	2,240	12,400	3400A (без Pb)	1,190	2,490	D-7620	0,436	–
3402-C (без Pb)	1,030	–	7409	2,110	4,350	D-10	6,840	7,460
7405	19,60	1,860	D-3484	0,639	1,070	D-321R	0,454	2,340

В связи с этим решали задачу оценки температурного режима трения для схемы брусок — кольцо, используемой в машине трения LFW-1 (см. рис. 1). Температуру трения  $T_{тр}$  для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров работы узла — контактного давления  $p$  и скорости скольжения  $v$  — можно определить по зависимости  $T_{тр} = f(p, v)$ , предложенной автором в работе [12].

Расчет температуры трения при СД для условий испытаний, соответствующих машине трения LFW-1 (ASTM D-2714), выполнили в следующей последовательности. Для зависимости  $T_{тр} = f(p, v)$ , представленной в работе [7], определили контактное давление  $p$  по формуле, приведенной автором в работе [13]. Кон-

тактное давление, полученное для условий трения на машине LFW-1 ( $N = 2860$  Н и  $v = 0,132$  м/с), составило 262,1 МПа.

Затем провели корректировку контактного давления с учетом изменения схемы трения с роликовой на схему ролик — плоскость. Для этого случая коэффициент снижения контактного давления  $K = 1,41$ . С учетом этого коэффициента контактное давление для машины трения LFW-1 было снижено в  $K$  раз и приняло значение 185,4 МПа. Вследствие выхода контактного давления за пределы варьирования при расчете температуры трения по формуле  $T_{тр} = f(p, v)$  выполнили расчет  $T_{тр}$  для  $p = 185,4$  МПа и  $v = 0,132$  м/с. Температура трения составила 97,4 °С.

В результате сравнения составов ТСП Molykote (см. табл. 2, 3) и ТСП, для которых автор получил термодинамические зависимости [14], установлено, что их полное совпадение имеет место для ТСП Molykote 3400A ( $MoS_2$

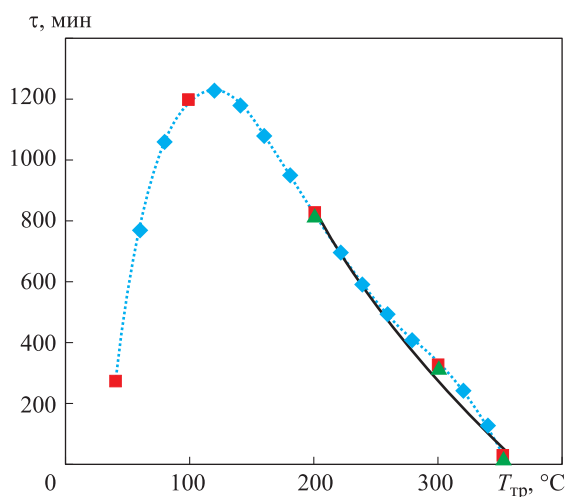


Рис. 4. Термодинамическая зависимость долговечности  $\tau_{ск}$  пары трения с ТСП на основе  $MoS_2$  с эпоксидным связующим ЭП-5 от температуры  $T_{тр}$ :

— исходный полином четвертого порядка для температуры  $T_{тр} = 40...350$  °С; ■ — экспериментальные данные; ▲ — расчетные данные для  $T_{тр} = 200...350$  °С; — логарифмическая зависимость (3) для  $T_{тр} = 200...350$  °С

Таблица 5

Результаты оценки долговечности пары трения с ТСП на основе  $MoS_2$  с эпоксидным связующим при переходе от СД с  $T_{тр} = 97,4$  °С к РД с  $T_{тр} = 74,1$  °С

Литературный источник	Долговечность, мин		Коэффициент снижения долговечности K
	$\tau_{ск}$	$\tau_{рев}$	
MoS <sub>2</sub> с эпоксидным связующим ЭП-5			
[15]	1189	990	1,2
Molykote 3400A			
[10]	1181	983	1,2
Molykote 3400A (без Pb)			
[10]	667	555	1,2
[11]	1389	1157	1,2

Таблица 6

**Результаты оценки долговечности пары трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с оксидным связующим при переходе от СД к РД для T<sub>тр</sub> = 74,1 °С**

Литературный источник	Тип ТСП	Долговечность, мин		Коэффициент снижения долговечности K
		τ <sub>ск</sub>	τ <sub>рев</sub>	
[10]	Molykote 3400A	983	470	2,09
[10]	Molykote 3400A (без Pb), 2014 г.	555	559	0,99
[11]	Molykote 3400A (без Pb), 2008 г.	1157	559	2,07

(12 %) со связующим в виде эпоксидной смолы) и отечественного ТСП, состоящего из того же наполнителя и эпоксидной смолы.

В связи с тем что температура трения при РД T<sub>тр</sub> = 74,1 °С не вошла в ранее исследованный автором температурный диапазон (более 100 °С), в качестве исходной термокорреляционной зависимости использовали данные исследований пар с ТСП, приведенные в работе [15].

Термокорреляционную зависимость τ<sub>ск</sub> = f(T<sub>тр</sub>) для ТСП указанного состава определяли по результатам испытаний для ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с оксидным связующим ЭП-5. Интерполяция экспериментальных данных с помощью программы MATLAB позволила получить следующую зависимость (рис. 4):

$$\tau_{ск} = -1,398 \cdot 10^6 T_{тр}^4 + 0,001334 T_{тр}^3 - 0,4567 T_{тр}^2 + 60,82 T_{тр} - 1509. \quad (2)$$

Описание долговечности полиномом четвертого порядка оказалось адекватным для диапазона температур T<sub>тр</sub> = 40...200 °С. В интервале T<sub>тр</sub> = 200...350 °С долговечность вычисляется как

$$\tau_{ск} = -1366 \ln T_{тр} + 8069. \quad (3)$$

Зависимость (3) представлена на рис. 4 логарифмической расчетной кривой для диапазона температур T<sub>тр</sub> = 200...350 °С.

Затем определяли температуру трения при РД, для чего по указанной методике [13] вычислили контактное давление p = 64,6 МПа. С учетом средней скорости скольжения v = 0,082 м/с для РД при угле поворота ±90° температура трения по формуле T<sub>тр</sub> = f(pv) [12] составила 74,1 °С. Значение p = 64,6 МПа для РД вошло в диапазон контактных давлений, при которых была получена зависимость (Δp = 23,1... 133,7 МПа). Скорость скольжения не-

существенно вышла за нижнюю границу указанного диапазона (Δv = 0,096...1,224 м/с).

С использованием формул (2) и (1) для ТСП отечественного производства (MoS<sub>2</sub> с оксидным связующим ЭП-5) проведен расчет изменения долговечности при скольжении в случае перехода от СД с температурой трения T<sub>тр</sub> = 97,4 °С к РД с T<sub>тр</sub> = 74,1 °С:

$$K = \frac{\tau_{97,4}}{\tau_{74,1}},$$

где τ<sub>97,4</sub> и τ<sub>74,1</sub> — долговечность пары с ТСП при T<sub>тр</sub> = 97,4 и 74,1 °С.

С помощью коэффициента K также пересчитана долговечность для ТСП Molykote 3400A и 3400A (без Pb). Результаты оценки долговечности τ<sub>ск</sub> пары трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с оксидным связующим при переходе от СД с температурой трения T<sub>тр</sub> = 97,4 °С к РД с T<sub>тр</sub> = 74,1 °С приведены в табл. 5.

Результаты оценки долговечности пар трения с ТСП на основе MoS<sub>2</sub> с оксидным связующим при переходе от СД к РД для одной температуры трения T<sub>тр</sub> = 74,1 °С приведены в табл. 6.

Среднее значение коэффициента снижения долговечности составило 1,72.

## Выводы

1. Анализ результатов испытаний фрикционных сопряжений с ТСП компании Molykote различных составов для условий РД позволил выявить следующее:

- согласно данным компании Molykote 2014 г., наибольшую долговечность при РД имеют ТСП 106 с оксидным связующим (τ = 4570 мин) и D-321R с полибутил-титанатным неорганическим связующим (τ = 4470 мин), причем их долговечность при РД существенно выше, чем при СД (соответственно в 1,76 и

2,2 раза). У ТСП D-106 (с эпоксидным связующим), D-3484 (с фенольным связующим), 7620 и D-7620 (с полиамид-имидным связующим) и D-321R (с полибутил-титанатным неорганическим связующим) долговечность при РД также больше, чем при СД. У остальных ТСП долговечность при РД меньше, чем при СД;

• согласно данным 2008 г., у всех типов ТСП Molykote долговечность при РД меньше, чем при СД. Наибольшую долговечность при РД имеют ТСП D-3484 с фенольным связующим ( $\tau = 3911$  мин) и ТСП 106 с эпоксидным связующим ( $\tau = 3130$  мин).

2. Установлено, что при переходе от СД к РД значения коэффициентов снижения долговечности для 2014 г. и 2008 г., существенно различаются. Если по данным 2014 г. у ТСП Molykote 106, D-106, D-3484, 7620 и D-321R долговечность при РД была больше, чем при СД, то по данным 2008 г. наоборот. Коэффициент снижения долговечности  $K = 1,07 \dots 19,6$ .

3. Предложена методика оценки долговечности реверсивного узла трения, которую можно реализовать в следующей последовательности:

• оценка температуры трения реверсивно работающего сопряжения с ТСП при контактном давлении  $p$  и скорости скольжения  $v$  с использованием термокорреляционной зависимости  $T_{\text{тр}} = f(pv)$ ;

• расчет долговечности пары трения с ТСП для скользящего сопряжения по термокорреляционной зависимости  $\tau_{\text{ск}} = f(T_{\text{тр}})$ ;

• оценка долговечности реверсивного узла трения с помощью коэффициента снижения долговечности  $K$  с применением зависимости  $\tau_{\text{рев}} = \tau_{\text{ск}}/K$ .

4. По данным отечественных и зарубежных исследований, для пары трения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$  с эпоксидным связующим среднее значение коэффициента снижения долговечности при переходе от СД к РД составляет 1,72.

## 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] Брейтуэйт Е.Р. *Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия*. Москва, Химия, 1967. 320 с.
- [4] Miyoshi K. *Solid Lubrication. Fundamentals and Applications Characterization of Solid Surfaces*. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 2001. 400 p.
- [5] Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. *Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 54 с.
- [6] 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.
- [7] Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. *Авиационная промышленность*, 2010, № 2, с. 49–52.
- [8] Евдокимов В.Д. *Реверсивность трения и качество машин*. Киев, Техника, 1977. 148 с.
- [9] *Материалы: Molykote. Антифрикционные покрытия*. URL: <http://atf.ru/production/category249/> (дата обращения 8 апреля 2018).
- [10] *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/> (дата обращения 8 апреля 2018).
- [11] *Руководство по выбору антифрикционных покрытий Molykote*. URL: [http://atf.ru/pdf/manual\\_choice\\_AF.pdf](http://atf.ru/pdf/manual_choice_AF.pdf) (дата обращения 8 апреля 2018).
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] Хопин П.Н. Термокореляционная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями для нормальных атмосферных условий. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 5, с. 225–229.
- [15] Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. *Твердые дисульфид-молибденовые смазки*. Москва, Химия, 1966. 152 с.

## 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.
- [2] Kovalev E.P., Ignat'ev M.B., Semenov A.P., Smirnov N.I., Nevolin V.N., Fominskiy V.Yu. Tverdosmazochnye pokrytiya dlya mashin i mekhanizmov, rabotayushchih v ekstremal'nyh usloviyah (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] Breytueyt E.R. *Tverdye smazochnye materialy i antifriktsionnye pokrytiya* [Solid lubricants and anti-friction coatings]. Moscow, Himiya publ., 1967. 320 p.
- [4] Miyoshi K. *Solid Lubrication. Fundamentals and Applications Characterization of Solid Surfaces*. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 2001. 400 p.
- [5] Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov 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.
- [6] 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.
- [7] Hopin P.N. Otsenka rabotosposobnosti par treniya s tverdosmazochnymi pokrytiyami v razlichnykh usloviyah funktsionirovaniya [Evaluation of the performance of friction pairs with solid-lubricant coatings in different operating conditions]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry]. 2010, no. 2, pp. 49–52.
- [8] Evdokimov V.D. *Reversivnost' treniya i kachestvo mashin* [Reversibility of friction and the quality of the machines]. Kiev, Tekhnika publ., 1977. 148 p.
- [9] *Materialy: Molykote. Antifriktsionnye pokrytiya* [Materials: Molykote. Antifriction coating]. Available at: <http://atf.ru/production/category249/> (accessed 8 April 2018).
- [10] *Tekhnicheskie opisaniya AFP (TSP) ot 03.10.2016 (dlya TSP MOLYKOTE® D-7409) ot 04.03.2014 (dlya 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/> (accessed 8 April 2018).
- [11] *Rukovodstvo po vyboru antifriktsionnykh pokrytiy Molykote* [Selection guide anti-friction coatings Molykote]. Available at: [http://atf.ru/pdf/manual\\_choice\\_AF.pdf](http://atf.ru/pdf/manual_choice_AF.pdf) (accessed 8 April 2018).
- [12] 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.
- [13] Khopin P.N., Popov O.V., Komarov V.A. Eksperimental'naya otsenka ra-botosposobnosti par treniya 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.
- [14] Hopin P.N. Termokorrelyatsionnaya otsenka rabotosposobnosti par treniya tverdosmazochnymi pokrytiyami dlya normal'nykh atmosferynykh usloviy [Thermocorrelation assess-



ment of operability of couples of friction with solid lubricating coatings for conditions of the normal atmospheric conditions]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making]. 2017, no. 5, pp. 225–229.

[15] Sentyurikhina L.N., Oparina E.M. *Tverdye disulfidmolibdenovye smazki* [A rigid disulfide-molybdenum grease]. Moscow, Himiya publ., 1966. 152 p.

Статья поступила в редакцию 19.06.2018

## Информация об авторах

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

**ТРУНОВА Елена Анатольевна** (Москва) — старший преподаватель кафедры «Технология испытаний и эксплуатации». МАИ (125993, Москва, А-80, ГСП-3, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: lew1967@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хопин П.Н., Трунова Е.А. Сравнительная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями зарубежного производства при скользящем и реверсивном движениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 10, с. 47–55, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-47-55.

### Please cite this article in English as:

Chopin P.N., Trunova E.A. A Comparative Assessment of Efficiency of Foreign-Made Friction Pairs with Solid Lubricant Coating when in Sliding and Reverse Motion. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 10, pp. 47–55, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-47-55.

## Information about the authors

**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: chopinp@mail.ru).

**TRUNOVA Elena Anatolievna** (Moscow) — Senior Lecturer, 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: lew1967@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
**Н.И. Сиднева**

### «Статистический анализ и теория планирования эксперимента»

Изложены краткие теоретические сведения по курсу «Теория планирования эксперимента». Представлено введение в статистический анализ и теорию планирования эксперимента. Основные понятия иллюстрируются примерами практического содержания, рассмотренными с позиций регрессионного анализа. Издание носит справочный характер и поможет студентам старших курсов овладеть методами теории планирования эксперимента, которые широко используются при решении прикладных задач.

Для студентов 4-6-го курсов инженерных специальностей технических университетов.

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