МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.892

МИКРОАНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НАНЕСЕНИЯ

П.Н. ХОПИН¹, д-р техн. наук, В.В. ГРИБ², д-р техн. наук

1 Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: chopinp@mail.ru

² Российский государственный университет нефти и газа

(Национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина,

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65, к. 1, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru

© Хопин П.Н., Гриб В.В., 2021

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальная толщина твердосмазочного покрытия суспензионного нанесения составляет от 20 ± 5 мкм (согласно отечественным литературным данным) до 7,62...12,7 мкм (согласно зарубежным источникам), магнетронного нанесения – 1 мкм. При трении исходная толщина суспензионного покрытия (~20 мкм) уменьшается настолько (до 2...3 мкм), что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку MoS₂. Это справедливо и для магнетронно нанесенных твердосмазочных покрытий. Оптимальная шероховатость обработки основы перед суспензионным нанесением составляет Ra = 0,3...0,6 мкм, для магнетронного нанесения – 0,2 мкм. С уменьшением шероховатости обработки основы перед магнетронным нанесением с Ra = 0,05...0,4 коэффициент трения сопряжения $f_{\rm Tp}$ снижается с 0,05 до 0,02.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, суспензионное и магнетронное нанесение, толщина покрытий, шероховатость основы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-5-17

введение

В современной промышленности для автономно работающих сопряжений широко используются твердосмазочные покрытия (ТСП) различных видов нанесения [1–3]. Несмотря на большое количество исследований ТСП, до настоящего времени нет единой теории трения, объясняющей все многообразие их смазочных свойств. Не рассматривался вопрос о соотношении толщины ТСП на основе MoS₂ со связующими веществами и ТСП магнетронного и других методов нанесения с позиций микрошероховатости взаимодействующих поверхностей. В связи со сказанным авторами были проведены дополнительные исследования в этом направлении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе было осуществлено сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 (наполнитель MoS₂, связующее мочевино-формальдегидная смола) в исходном и приработанном состоянии при помощи сканирующего рентгеновского

микроскопа Super Probe-733» японской фирмы JEOL во вторичной электронной эмиссии при ускоряющем напряжении E = 25 кВ и токе зонда $I = 3 \cdot 10^{-8}$ A [4]. Оценка микротопографии поверхностей трения осуществлялась с помощью профилографа-профилометра модели 252 завода «Калибр».

Рентгеновский микроанализ трущихся поверхностей проводился с помощью анализатора LINK серии 860. Исследовались поверхности трения с ТСП ВНИИ НП 212 (материал основы – закаленная сталь ШХ15), имеющие различную степень наработки на машине трения СМТ-1 при нагрузке $N = 1\,000$ Н и скорости скольжения V = 0.5 м/с.

Схема трения установки Е.W. Roberts [5] для проведения трибовакуумных испытаний по схеме «диск – тройной индентор» представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема трения установки для трибоиспытаний в вакууме при $p = 1,33 \cdot 10^{-5}$ Па [5]

Диск с покрытием MoS₂ вращался относительно трех сферических инденторов радиусом R = 3,67 мм. Общая контактная нагрузка N составила 50 H, соответственно, на каждый индентор N = 16,7 H. Частота вращения дисков n = 400 об/мин, что эквивалентно скорости скольжения V = 1,2 м/с. Откачные средства на основе ионного и турбомолекулярных насосов обеспечивали вакуум $6,65 \cdot 10^{-5}$ Па. Индентор и диск были изготовлены из подшипниковой стали (52100), титанового сплава (IMI 318, содержащего 6 % алюминия и 4 % ванадия) и нитрида кремния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сканирование поверхности образца с ТСП ВНИИ НП 212 в исходном и приработанном состояниях. В результате проведения данной операции была получена фотография граничного участка исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП, представленная на рис. 2, которая показывает, что в процессе приработки исходная структура поверхности ТСП претерпевает существенные изменения.

Внешний вид приработанной смазочной пленки MoS₂ представлен на рис. 3, где на однородной поверхности образца с ТСП имеют место локальные отслоения смазочной пленки MoS₂. Визуальный микроанализ мест разрушений позволил обнаружить наличие на смазочной поверхности:

1) глубоких рисок, оставленных выступами шероховатой поверхности контртела, между которыми и располагаются несущие слои смазочной пленки MoS₂;

2) мелких точечных вздутий, идентичных пузырьковым образованиям, отмеченным в работе [6]; 3) локальных отслоений смазочной пленки.



Рис. 2. Граничный участок исходной и приработанной поверхностей образца с ТСП, увеличение х400



Рис. 3. Внешний вид приработанной поверхности образца с ТСП

Частицы MoS₂, хаотически закрепленные после напыления в связующем полимере (рис. 4), после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения (рис. 5).

Очевидно, что поверхностные разрушения связаны с механизмом взаимодействия связки, самой смазочной пленки и микронеровностей поверхностей основы и контртела.



Рис. 4. Структура исходной поверхности образца с ТСП. Увеличение х4000



Рис. 5. Структура приработанной поверхности образца с ТСП. Увеличение х4 000

Оценка микротопографии поверхностей трения. В связи с вышесказанным на следующем этапе исследовались изменения в процессе трения топографических характеристик контактирующих поверхностей. Полученные профили поверхностей образца с ТСП и контртела в исходном состоянии и после приработки представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Согласно полученным данным, вне зависимости от исходной толщины ТСП основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и лишь 20...25 % – на установившийся режим трения. Таким образом, именно смазочная пленка толщиной в 2...3 мкм обеспечивает в основном функционирование пары трения в течение почти всего срока службы покрытия. Рентгеноструктурный анализ показал, что толщина ТСП в начальный период составляет 2...5 мкм, а в период задира – 0,4...0,6 мкм [7].



Рис. 6. Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, нанесенного ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки 11 (после пескоструйной обработки) в исходном состоянии пары трения перед испытаниями. Вертикальное увеличение х5 000, горизонтальное увеличение х100, *R*а _{ТСП} = 1,44 мкм; δ = 20 мкм; *R*а _{основы} = 0,75 мкм

Анализ профилограмм, приведенных на рис. 6 и 7, показывает, что в процессе приработки существенно изменяется топографическое состояние контактных поверхностей пары трения с ТСП. Кроме изнашивания исходного слоя покрытия толщиной $\delta = 20$ мкм до толщины 2...3 мкм, происходит приработка поверхностей образца с ТСП и контртела до близких значений равновесной шероховатости *R*а контртела – 0,18 мкм, *R*а_{тСП} = 0,22 мкм. С учетом известного соотношения [8]

$$R \max \approx Rz = 6 \cdot Ra \tag{1}$$

сумма значений наибольшей высоты неровностей профиля материала основы и контртела после приработки составила ($R_{\max \text{ осн}} + R_{\max \text{ контртела}}$) для исходного состояния 6,18 мкм, а после приработки – 4,92 мкм. На основании этого можно заключить, что для рассматриваемых условий трения исходная толщина ТСП (~20 мкм) уменьшается до 2...3 мкм, т.е. настолько, что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку MoS₂. Причем это взаимодействие наступает именно в тот момент, когда коэффициент трения стабилизируется, т.е. создаются наиболее благоприятные условия смазывания поверхностей. Графическая интерпретация топографической модели трения пары с ТСП на основе MoS₂ со связующим представлена на рис. 8.

Используя предложенную модель трения, можно предположить, что причиной образования микродефектов, которые наблюдались многими исследователями сразу после образования сплошной смазочной пленки [6], является выход на поверхность отдельных наиболее высоких микровыступов неровностей материала основы.



Рис. 7. Совмещенные профилограммы поверхностей (сверху вниз) контртела 1, приработанной пленки ТСП ВНИИ НП 212 (на образце) и подложки (основы) 11 после приработки пары трения. Вертикальное увеличение x5 000, горизонтальное увеличение x100, *R*a _{TCΠ} = 0,22 мкм; δ = 2...3 мкм; *R*a _{основы} = 0,64 мкм



Рис. 8. Топографическая модель трения пары о ТСП на основе MoS₂ со связующим веществом: в исходном состоянии (а) и после приработки (б)

Рентгеновский микроанализ трущихся поверхностей. Анализ полученных данных, представленных в работе [4], показал следующее:

1) на всех этапах наработки начиная с окончания приработки, кроме основных элементов смазочной пленки MoS₂, т.е. Мо и S, на диаграммах наблюдается Fe;

2) по мере наработки на неповрежденных участках, где сохранилась пленка ТСП, мощность пика, соответствующего железу, возрастает, т.е. все большее число неровностей основы или выступает на поверхность, или оказывается в непо-

средственной близости от нее; так, например, при времени наработки $\tau = 28$ мин Fe = = 16 %; при $\tau = 180$ мин Fe = 25 %, а при $\tau = 360$ мин Fe = 44 %;

3) пик Fe наблюдается не только на поврежденных местах, но и в структуре смазочной пленки (на неповрежденных участках), хотя и существенно меньший по мощности, причем содержание Fe близко к содержанию основных элементов смазочной пленки MoS₂;

4) большая интенсивность пика S по сравнению с Mo связана с тем, что в структуре MoS₂ на один атом молибдена приходится два атома S;

5) появление в незначительных количествах хрома определяется химическим составом металла основы, т.е. подшипниковой стали ШХ15, где Сг имеет наибольший процент из всех легирующих элементов (1,3...1,65 %);

6) снижение содержания Мо и S при переходе от смазочной пленки (неповрежденные места) к местам дефектов объясняется тем, что частицы MoS₂ распределены хаотично и не дают таких интенсивных пиков, как в смазочной структуре.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наибольшие выступы микронеровностей металлической основы могут выходить на поверхность трения при уменьшении толщины ТСП с 20 мкм до нескольких микрометров. В этот момент на поверхности трения образуется смазочная пленка MoS_2 , о чем свидетельствует резкое снижение $f_{\rm TP}$. [9]. В дальнейшем на установившемся режиме именно шероховатость поверхности основы выдерживает всю нагрузку на контакт, а низкое трение обеспечивается смазочной пленкой MoS_2 , удерживаемой на поверхности трения между микронеровностями основы за счет связующих компонентов композиционного ТСП. Следовательно, если контактная нагрузка не превысит предела текучести материала основы (что имеет место в данном случае, при использовании образцов из закаленной стали ШХ15, HRC = 60), то ресурс работы рассматриваемого типа ТСП будет определяться ресурсом связующего. Подтверждением этому служит тот факт, что без связующего как MoS_2 , так и графит имеют малый срок работы на поверхностях трения.

Согласно отечественным литературным данным [10] оптимальная толщина ТСП суспензионного нанесения составляет 20 ± 5 мкм. Шероховатость отпескоструенной металлической основы Rz = 1, 6...3, 2 мкм, что с учетом соотношения (1) составит Ra = 0, 3...0, 6 мкм.

Аналогичные толщины ТСП суспензионного нанесения приведены в методике фирмы Molykote. Согласно [11] рекомендована толщина 5...20 мкм при оптимальной шероховатости основы Ra = 0.5 мкм (рис. 9).

Согласно инструкции [12], для применения ТСП со связующими фенольного типа, эпоксидными и силикатами Everlube 620C, Everlube 811, Everlube 812, Ecoalube 642, Tiolube 460 обработка основы выполняется до шероховатости поверхности по параметру среднеквадратического отклонения микронеровностей Rq = 32 мкм, что соответствует Ra = 0.8 мкм при оптимальной исходной толщине ТСП $\delta = 7,62...12,7$ мкм, и согласуется с рекомендациями отечественной инструкции [10].

К числу широко используемых в настоящее время ТСП относятся покрытия, нанесенные магнетронным, радиочастотным и другими методами вакуумного напыления [2].



Рис. 9. Срок службы ТСП в зависимости от вида предварительной обработки и степени шероховатости основы [11]: 1 – пескоструйная обработка и фосфатирование; 2 – пескоструйная обработка; 3 – полированная поверхность

Анализ микротопографии поверхностей трения ТСП MoS₂, нанесенных магнетронным методом. Согласно данным работы [2] толщина ТСП на основе MoS₂ магнетронного радиочастотного нанесения, обеспечивающая высокую износостой-кость, составила 1 ± 0.2 мкм при шероховатости поверхности ТСП Ra = 0.032 мкм (причем для ТСП толщиной $\delta = 0.2$ мкм ресурс покрытия существенно снижался). Шероховатость подложки Ra = 0.009 мкм.

В работе T. Spalvins [13] приводится динамика износа ТСП магнетронного нанесения (рис. 10).



Рис. 10. Структура смазочной пленки ТСП магнетронного нанесения до и после трения скольжения [13]: морфологический рост напыленных пленок MoS₂ (а) и перелом при скольжении напыленной пленки MoS₂ (б)

Анализ динамики износа ТСП магнетронного нанесения (рис. 9), показывает, что во время приработки ТСП толщиной порядка $\delta = 1$ мкм происходит разрушение верхнего слоя ТСП (около 80 %) и формирование смазочной пленки толщиной $\delta = 0,2$ мкм, обеспечивающей практически весь ресурс покрытия.

В работе [5] исследовалось влияние шероховатости основы и вида материала на износостойкость и антифрикционные свойства ТСП MoS_2 магнетронного нанесения толщиной $\delta = 1$ мкм в условиях вакуума (анализировалась шероховатость Ra = 0,04; 0,12; 0,25; 0,4 мкм на титановой, стальной и керамической основах).

В работе E.W. Roberts [5] были реализованы трибовакуумные испытания по схеме «диск – тройной индентор» на установке, схематически показанной на рис. 1.

Изменение износостойкости покрытий ТСП на различных подложках отражено на рис. 11. Анализ результатов исследований, представленных на рис. 11, показывает, что наибольшую износостойкость обнаруживает ТСП на керамической и металлической основах при оптимальной шероховатости подложки *R*a = 0,2 мкм.

Зависимость антифрикционных характеристик ТСП на металлической основе от ее шероховатости представлена на рис. 12. Анализ этой зависимости показывает, что с ростом шероховатости основы в рассмотренных границах коэффициент трения фрикционного сопряжения снижается.

Число оборотов диска



Рис. 11. Изменение износостойкости ТСП MoS₂ магнетронного нанесения в зависимости от шероховатости поверхности основы для трех исследуемых материалов: + – нитрид кремния; □ – сталь 52100; * – титановый сплав [5]



Рис. 12. Изменение коэффициента трения ТСП MoS₂ магнетронного нанесения в зависимости от шероховатости для стальной подложки 52100 [5]

Таким образом, с учетом изменения износостойкости и антифрикционных характеристик для пар трения с ТСП магнетронного нанесения оптимальным следует признать шероховатость основы Ra = 0,2 мкм, равной толщине приработанной пленки исследуемого покрытия (см. рис. 9). Учитывая заключение, сделанное ранее для суспензионных ТСП о возможности выхода наиболее высоких неровностей на поверхности трения, можно сделать аналогичный вывод и для ТСП магнетронного нанесения, где оптимальная толщина приработанной пленки ТСП соизмерима со средней арифметической шероховатостью подложки, а значения наибольшей высоты неровностей с учетом соотношения (1) могут составить

$$R\max = 6 \cdot Ra = 1,2 \text{ мкм.}$$

Значения толщины ТСП различных методов нанесения и шероховатости основы представлены в таблице.

	Толщина ТСП, мкм		
Тип ТСП	После нанесения ТСП	После приработки	Шероховатость основы Ra, мкм
Суспензионного нанесения (СН) по рекомендациям инструкции ВНИИ НП [10]	20 ± 5	23 (в период задира 0,40,6)	0,30,6
CH по данным фирмы Molykote [11]	520	_	0,5
СН по рекомендациям инструкции [12]	7,6212,7	_	_
Магнетронного напыления (МН) по данным К. Miyoshi [2] (в вакууме)	1 ± 0,2	_	0,009
MH по данным T. Spalvins [13]	1	0,2	_
МН по данным E.W. Roberts [5] (в вакууме)	1	0,2 (оптимальная)	_

Значения толщин ТСП и шероховатости материала основы для различных методов нанесения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено:

1) оптимальная толщина ТСП суспензионного нанесения δ составляет от 20 \pm 5 мкм (согласно отечественным литературным данным) до 7,62...12,7 мкм (согласно зарубежным источникам);

2) частицы MoS₂, хаотически закрепленные после напыления в связующем полимере, после приработки ориентируются своими базисными поверхностями вдоль поверхности трения;

3) вне зависимости от исходной толщины ТСП суспензионного нанесения основная часть изношенного слоя (75...80 %) приходится на период приработки и

лишь 20...25 % – на установившийся режим трения (толщина ТСП указанного типа изменяется от 2...3 мкм после приработки до 0,4...0,6 мкм в период задира);

4) исходная толщина суспензионного ТСП (~20 мкм) уменьшается до 2...3 мкм, т.е. настолько, что происходит контактирование наиболее высоких микронеровностей через смазочную пленку MoS₂.

5) оптимальная шероховатость обработки основы перед суспензионным нанесением согласно инструкции ВНИИ НП Ra = 0,3...0,6 мкм (опескоструенная поверхность), по данным фирмы Molykote Ra = 0,5 мкм

6) оптимальная толщина ТСП магнетронного нанесения составляет 1 мкм;

7) оптимальная по износостойкости шероховатость обработки основы перед магнетронным нанесением *R*a = 0,2 мкм;

8) с уменьшением шероховатости обработки основы перед магнетронным нанесением с Ra = 0.05 до 0,4 коэффициент трения сопряжения $f_{\rm TP}$ снижается с 0,05 до 0,02.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка). М.: ЭкоПресс, 2010. 604 с.

2. Miyoshi K.: Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. Marcel Dekker, inc. New York I Basel, 2001. 400 p.

3. Гриб В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с.

4. Хопин П.Н. Оценка долговечности твердосмазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 4. С. 787–793.

5. Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS_2 films // Journal of physics D: Applied physics. 1992. V. 25. No 1A. P. A65–A70.

6. Де Ге А.В.Д., Саломон Г., Заат Д.Х. Механизм разрушения пленки дисульфида молибдена при трении скольжения: избр. доклады на международной конференции по смазочным материалам. Вашингтон, 1964; пер. с англ. М.: Химия, 1967. С. 242–254.

7. Кармадонов А.Ф., Брудный А.И., Кирьянов А.М. Исследование износа и долговечности дисульфидмолибденовой пленки при граничном трении // *Твердые смазочные покрытия*. М.: Наука, 1977. С. 53–61.

8. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука. 1974. 112 с.

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. Сентюрихина Л.Н., Рубцова З.С. Инструкция по нанесению твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, на поверхности трения. М.: Химия, 1967. 12 с.

11. Руководство по выбору смазочных материалов Molykote. URL: https://atf.ru/upload/iblock/79a/79a889f77349f351ca15d878b5ebb57c.pdf (дата обращения: 30.11.2020).

12. Process Specification for Dry-Film Lubricant Application. Daila Gonzalez. Lyndon B. Johnson Space Center. Structural Engineering Division. Houston, Texas. January 2013. 13 p.

13. Spalvins T. Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control. National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio 44135-3191. NASA Technical Memorandum 103652. 1991. 15 p.

Для цитирования: Хопин П.Н., Гриб В.В. Микроанализ поверхностей трения твердосмазочных покрытий различных видов нанесения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 5–17.

MICROANALYSIS OF THE FRICTION SURFACES OF SOLID LUBRICATING COATINGS OF VARIOUS TYPES OF APPLICATION

P.N. KHOPIN¹, Dr. Sc., V.V. GRIB², Dr. Sc.

¹ Moscow aviation institute (National research university), 4, Volokolamsk highway, 125993, Moscow, Russian Federation, e-mail: chopinp@mail.ru
² National university of oil and gas «Gubkin University», 65, building 1, Leninsky prospekt, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: grib-vladimir.g@ya.ru

As a result of the studies, it was found that the optimal thickness of the solid lubricant coating for suspension application is from 20 ± 5 microns (according to domestic literature data) to 7,62...12,7 microns (according to the US instructions), for magnetron deposition – 1 micron. During friction, the initial thickness of the suspension coating (~20 µm) decreases so much (2...3 µm) that contact of the highest microroughnesses occurs through the MoS₂ lubricating film, which is also observed for magnetron applied solid lubricant coatings. Optimal roughness of base processing before suspension deposition is Ra = 0,3...0,6 µm, for magnetron deposition – 0.2 µm. With a decrease in the roughness of the base processing before magnetron deposition is fract of the interface decreases from $f_f = 0,05$ to 0,02.

Keywords: solid lubricating coatings, suspension and magnetron deposition, coating thickness, base roughness.

REFERENCES

1. Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. Prikladnaya tribologiya (treniye, iznos i smazka) [Applied tribology (friction, wear and lubrication)]. Moscow: EkoPress, 2010. 604 p.

2. Miyoshi K. Solid Lubrication. Fundamentals and Applications. Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. Marcel Dekker, inc. New York l Basel. 2001. 400 p.

3. Grib V.V. Laboratornyye ispytaniya materialov na treniye i iznos [Laboratory tests of materials for friction and wear]. Moscow: Nauka. 1968. 141 p.

4. Khopin P.N. Evaluation of the durability of solid-lubricant coatings based on the analysis of the topography of friction surfaces. *Friction and wear*. 1995. V. 16. No. 4, pp. 787–793. (In Russian).

5. Roberts E.W., Williams B.J., Ogilvy J.A. The effect of substrate surface roughness on the friction and wear of sputtered MoS₂ films. *Journal of physics D: Applied physics*. 1992. V. 25. No. 1A, pp. A65–A70.

6. De Ge A.V., Salomon G., Zaat D.H. The mechanism of destruction of the molybdenum disulfide film during sliding friction. Selected reports at the international conference for lubricants. Washington. 1964. per. s angl. Moscow: Khimiya, 1967. pp. 242–254.

7. Karmadonov A.F., Brudnyy A.I., Kiryanov A.M. Study of wear and durability of disulfidmolybdenum film under boundary friction: Collection of articles *Solid lubricating coatings.*, Moscow: Nauka, 1977, pp. 53–61.

8. Kombalov B.C. Vliyaniye sherokhovatosti tvordykh tel na treniye i iznos [Influence of the roughness of solids on friction and wear]. Moscow: Nauka, 1974. 112 p.

9. Khopin P.N., Popov O.V., Komarov V.A. Experimental evaluation of the performance of friction pairs with a solid-lubricant coating depending on the temperature factor. *Friction and wear.* 1985. V. 6, No. 6, pp. 1109–1116. (In Russian).

10. Sentyurikhina L.N., Rubtsova Z.S. Instruktsiya po naneseniyu tvordykh smazochnykh pokrytiy, soderzhashchikh disulfid molibdena, na poverkhnosti treniya. [Instructions for applying solid lubricants containing molybdenum disulfide on the friction surface]. Moscow: Khimiya. 1967, 12 p.

11. Rukovodstvo po vyboru smazochnykh materialov Molykote [Guidelines for the selection of Molykote lubricants]. URL: https://atf.ru/upload/iblock/79a/79a889f77349f351ca15d878b5ebb57c.pdf (date accessed: 30.11.2020). (In Russian).

12. Process Specification for Dry-Film Lubricant Application. Daila Gonzalez. Lyndon B. Johnson Space Center. Structural Engineering Division. Houston, Texas. January 2013. 13 p.

13. Spalvins T. Plasma-assisted physical vapor deposition surface treatments for tribological control. National Aeronautics and Space Administration. Lewis Research Center. Cleveland, Ohio 44135-3191. NASA Technical Memorandum 103652. 1991. 15 p.

Поступила в редакцию/received: 13.11.2020; после рецензирования/revised: 05.12.2020; принята/accepted 15.12.2020