

УДК 621.89.017

## Трибологические свойства антифрикционных покрытий на основе дисульфида молибдена в экстремальных условиях

М.В. Прожега<sup>1</sup>, Е.О. Решиков<sup>1</sup>, Е.О. Константинов<sup>1</sup>, М.М. Харьков<sup>2</sup>, Ф.А. Григорьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, М. Харитоньевский пер., 4, г. Москва 101990, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, г. Москва 115409, Россия

<sup>3</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь

Поступила в редакцию 01.11.2022.

После доработки 21.12.2022.

Принята к публикации 22.12.2022.

В работе исследовали трибологические свойства в экстремальных условиях, структуру и химический состав антифрикционных покрытий на основе дисульфида молибдена, нанесённых магнетронным осаждением и распылением суспензии с различными типами плёнкообразователя на поверхность образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Трибологические испытания в соответствии со стандартом ASTM G133 проводили при возвратно-поступательном перемещении шара из стали ШХ15 диаметром 6,35 мм в вакууме при температуре образцов 250 °С. Определили коэффициент трения и ресурс покрытий в экстремальных условиях эксплуатации. Покрытия суспензионного нанесения показали коэффициент трения 0,046—0,049, покрытие магнетронного осаждения 0,061. Максимальный ресурс покрытий суспензионного нанесения составил 19,7—21,8 часа, магнетронного — 22,7 часа.

**Ключевые слова:** дисульфид молибдена, антифрикционные покрытия, трибологические испытания, вакуум, твердая смазка, магнетронное напыление, износ, испытания шар—плоскость, композиционные покрытия.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

---

**Адрес для переписки:**

М.В. Прожега  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
М. Харитоньевский пер., 4, г. Москва 101990, Россия  
e-mail: prmaksim@iuash.ru

**Address for correspondence:**

M.V. Prozhega  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonyevskiy pereulok, 4, Moscow 101990, Russia  
e-mail: prmaksim@iuash.ru

---

**Для цитирования:**

М.В. Прожега, Е.О. Решиков, Е.О. Константинов, М.М. Харьков, Ф.А. Григорьев.

Трибологические свойства антифрикционных покрытий на основе дисульфида молибдена в экстремальных условиях.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 6. — С. 640—650.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

**For citation:**

M.V. Prozhega, E.O. Reschikov, E.O. Konstantinov, M.M. Kharkov, F.A. Grigoriev.

[Tribological Properties of Anti-Friction Molybdenum Disulfide Coatings under Extreme Conditions].

*Trenie i Iznos.*

2022, vol. 43, no. 6, pp. 640—650 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

# Tribological Properties of Anti-Friction Molybdenum Disulfide Coatings under Extreme Conditions

M.V. Prozhega<sup>1</sup>, E.O. Reschikov<sup>1</sup>, E.O. Konstantinov<sup>1</sup>, M.M. Kharkov<sup>2</sup>, F.A. Grigoriev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonyevskiy pereulok, 4, Moscow 101990, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe shosse, 31, Moscow 115409, Russia

<sup>3</sup>Metal-Polymer Research Institute of Belarus National Academy of Sciences,  
Kirov street, 32a, Gomel 246050, Belarus

Received 01.11.2022.

Revised 21.12.2022.

Accepted 22.12.2022.

## Abstract

The tribological properties under extreme conditions, the structure and chemical composition of antifriction coatings based on molybdenum disulfide, deposited by magnetron deposition and suspension spraying with various types of film former on the surface of stainless steel samples (AISI 321), were studied. Tribological reciprocating movement tests in accordance with the ASTM G133 were carried. A steel 100Cr6 6.35 mm diameter ball was used as a counter sample. Tests were conducted in vacuum at 250 °C. The coefficient of friction and the lifetime of coatings under extreme operating conditions were determined. Suspension coatings showed a friction coefficient of 0.046—0.049, magnetron deposited coating 0.061. The maximum service life of suspension coatings was 19.7—21.8 hours, magnetron deposited — 22.7 hours.

**Keywords:** molybdenum disulfide, antifriction coatings, tribological tests, vacuum, solid lubricant, magnetron sputtering, wear, ball on plate tests, composite coatings.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

---

### Адрес для переписки:

М.В. Прожега  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской  
академии наук,  
М. Харитоньевский пер., 4, г. Москва 101990, Россия  
e-mail: prmaksim@iuash.ru

### Address for correspondence:

M.V. Prozhega  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of  
Sciences,  
M. Kharitonyevskiy pereulok, 4, Moscow 101990, Russia  
e-mail: prmaksim@iuash.ru

---

### Для цитирования:

М.В. Прожега, Е.О. Решиков, Е.О. Константинов, М.М. Харьков,  
Ф.А. Григорьев.

Трибологические свойства антифрикционных покрытий на основе  
дисульфида молибдена в экстремальных условиях.  
Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 6. — С. 640—650.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

### For citation:

M.V. Prozhega, E.O. Reschikov, E.O. Konstantinov, M.M. Kharkov,  
F.A. Grigoriev.

[ Tribological Properties of Anti-Friction Molybdenum Disulfide  
Coatings under Extreme Conditions ].

*Trenie i Iznos.*

2022, vol. 43, no. 6, pp. 640—650 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650

## Список использованных источников

1. **Scharf T.W. and Prasad S.V.** Solid Lubricants: a Review // *J. Mater. Sci.* — 2013 (**48**), 511—531. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>
2. **Moumita Sarkar and Nilrudra Mandal.** Solid Lubricant Materials for High Temperature Application: A Review // *Materials Today: Proceedings.* — 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.030>
3. **Семенов А.П.** Высокотемпературные твердые смазочные вещества // *Трение и износ.* — 2007 (**28**), № 5, 525—538
4. **Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A., and Baykara M.Z.** Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub>: A Review // *Lubricants.* — 2019, no. 7, 57. <https://doi.org/10.3390/lubricants7070057>
5. **Shankara A., Menezes P.L., Simha K.R.Y. et al.** Study of Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub> Coating in the Presence of Additives Using Reciprocating Ball-on-Flat Scratch Tester // *Sadhana.* — 2008 (**33**), 207—220. <https://doi.org/10.1007/s12046-008-0014-5>
6. **Хопин П.Н.** Комплексная оценка триботехнических показателей сопряжений с твердосмазочными покрытиями: дис. ... д-ра техн. наук. — Москва. — 2018
7. **Prozhega M.V., M.M. Kharkov, Reschikov E.O., Rykunov G.I., Kaziev A.V., Kukushkina M.S., Kolodko D.V. and Stepanova T.V.** Estimation of MoS<sub>2</sub> Coating Performance on Bronze and Steel in Vacuum at High Temperatures // *Coatings.* — 2022 (**12**), no. 2, 125; <https://doi.org/10.3390/coatings12020125>
8. **Serles P., Gaber K., Pajovic S., Colas G., and Filleter T.** High Temperature Microtribological Studies of MoS<sub>2</sub> Lubrication for Low Earth Orbit // *Lubricants.* — 2020, no. 8, 49. <https://doi.org/10.3390/lubricants8040049>
9. **Хопин П.Н.** Исследование механизмов трения и оценка трибологических характеристик твердосмазочных покрытий, нанесенных разными методами // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* — 2022, № 4(745), 73—86. DOI 10.18698/0536-1044-2022-4-73-86
10. **Хопин П.Н.** Эффективность функционирования трибосопряжений с твердосмазочными покрытиями на основе MoS<sub>2</sub>, нанесенными магнетронным и суспензионным методами // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* — 2019, № 9(714), 96—104. DOI 10.18698/0536-1044-2019-9-96-104
11. **Wolfgang Tillmann, Alexandra Wittig, Dominic Stangier, Henning Moldenhauer, Carl-Arne Thomann, Joerg Debus, Daniel Aurich, and Andreas Bruemmer.** Temperature-Dependent Tribological behavior of MoS<sub>x</sub> Thin Films Synthesized by HiPIMS // *Tribology International.* — 2021 (**153**), 106655. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106655>
12. **Yang J.F., Jiang Y., Hardell J. et al.** Influence of Service Temperature on Tribological Characteristics of Self-Lubricant Coatings: A Review // *Front. Mater. Sci.* — 2013, no. 7, 28—39. <https://doi.org/10.1007/s11706-013-0190-z>
13. **Kristine Dreva, Ardian Morina, Liuquan Yang, and Anne Neville.** The Effect of Temperature on Water Desorption and Oxide Formation in MoS<sub>2</sub> coatings and its impact on tribological properties // *Surface and Coatings Technology.* — 2022 (**433**), 128077. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128077>
14. **Прудников М.И.** Антифрикционные твердосмазочные покрытия modengy - от идеи до реализации на практике // *Главный механик.* — 2018, № 1-2, 56—60
15. **Prozhega M.V., Reschikov E.O., Shirshov A.D., and Yakovenko N.G.** Frictional Properties of 3D Printing Polymers in Vacuum // *Journal of Friction and Wear.* — 2020 (**41**), no. 6, 565—570. DOI: [org.10.3103/S1068366620060173](https://doi.org/10.3103/S1068366620060173)
16. **Descartes, C. Godeau, Y. Berthier** Friction and Lifetime of a Contact Lubricated by a Solid Third Body Formed from an MoS<sub>1.6</sub> Coating at Low Temperature // *Wear.* — 2015 (**330–331**), 478—489. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.027>
17. **Meng F., Yang C., and Han H.** Study on Tribological Performances of MoS<sub>2</sub> Coating at High Temperature // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* — 2018 (**232**), no. 8, 964—973. doi:10.1177/1350650117735272

## References

1. **Scharf T.W. and Prasad S.V.** Solid Lubricants: a Review // *J. Mater. Sci.* — 2013 (**48**), 511—531. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>
2. **Moumita Sarkar and Nilrudra Mandal.** Solid Lubricant Materials for High Temperature Application: A Review // *Materials Today: Proceedings.* — 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.030>
3. **Semenov A.P.** High-temperature lubricants // *Journal of Friction and Wear.* — 2007 (**28**), no. 5, 525—538 (in Russian)
4. **Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A., and Baykara M.Z.** Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub>: A Review // *Lubricants.* — 2019, no. 7, 57. <https://doi.org/10.3390/lubricants7070057>
5. **Shankara A., Menezes P.L., Simha K.R.Y. et al.** Study of Solid Lubrication with MoS<sub>2</sub> Coating in the Presence of Additives Using Reciprocating Ball-on-Flat Scratch Tester // *Sadhana.* — 2008 (**33**), 207—220. <https://doi.org/10.1007/s12046-008-0014-5>
6. **Khopin P.N.** Comprehensive assessment of tribotechnical indicators of interfaces with solid lubricant coatings [Kompleksnaya otsenka tribotekhnicheskikh pokazateley sopryazheniy s tverdosmazochnymi pokrytiyami]. Doctor's degree dissertation. — Moscow. — 2018 (in Russian)
7. **Prozhega M.V., M.M. Kharkov, Reschikov E.O., Rykunov G.I., Kaziev A.V., Kukushkina M.S.,**

- Kolodko D.V. and Stepanova T.V.** Estimation of MoS<sub>2</sub> Coating Performance on Bronze and Steel in Vacuum at High Temperatures // *Coatings*. — 2022 (12), no. 2, 125; <https://doi.org/10.3390/coatings12020125>
8. **Serles P., Gaber K., Pajovic S., Colas G., and Filleter T.** High Temperature Microtribological Studies of MoS<sub>2</sub> Lubrication for Low Earth Orbit // *Lubricants*. — 2020, no. 8, 49. <https://doi.org/10.3390/lubricants8040049>
9. **Khopin P.N.** On the Friction Mechanisms and Assessment of Tribological Characteristics of Solid Lubricant Coatings of Various Application Methods // *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. — 2022, no. 4, 73—86. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-73-86>
10. **Khopin P.N.** The Efficiency of Tribocoupling with MoS<sub>2</sub>-Based Solid Lubricant Coatings Using Magnetron and Suspension Sputtering // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. — 2019, no. 9, 96—104. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-96-104>
11. **Wolfgang Tillmann, Alexandra Wittig, Dominic Stangier, Henning Moldenhauer, Carl-Arne Thomann, Joerg Debus, Daniel Aurich, and Andreas Bruemmer.** Temperature-Dependent Tribological behavior of MoS<sub>x</sub> Thin Films Synthesized by HiPIMS // *Tribology International*. — 2021 (153), 106655. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106655>
12. **Yang J.F., Jiang Y., Hardell J. et al.** Influence of Service Temperature on Tribological Characteristics of Self-Lubricant Coatings: A Review // *Front. Mater. Sci.* — 2013, no. 7, 28—39. <https://doi.org/10.1007/s11706-013-0190-z>
13. **Kristine Dreva, Ardian Morina, Liuquan Yang, and Anne Neville.** The Effect of Temperature on Water Desorption and Oxide Formation in MoS<sub>2</sub> coatings and its impact on tribological properties // *Surface and Coatings Technology*. — 2022 (433), 128077. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128077>
14. **Prudnikov M.I.** Solid Lubricant Anti-Friction Coating by Modengy: From Idea to Practice // *Glavnyy mekhanik*. — 2018, no. 1-2, 56—60 (in Russian)
15. **Prozhega M.V., Reschikov E.O., Shirshov A.D., and Yakovenko N.G.** Frictional Properties of 3D Printing Polymers in Vacuum // *Journal of Friction and Wear*. — 2020 (41), no. 6, 565—570. DOI: [org.10.3103/S1068366620060173](https://doi.org/10.3103/S1068366620060173)
16. **Descartes, C. Godeau, Y. Berthier** Friction and Lifetime of a Contact Lubricated by a Solid Third Body Formed from an MoS<sub>1.6</sub> Coating at Low Temperature // *Wear*. — 2015 (330–331), 478—489. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.027>
17. **Meng F., Yang C., and Han H.** Study on Tribological Performances of MoS<sub>2</sub> Coating at High Temperature // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. — 2018 (232), no. 8, 964—973. doi:10.1177/1350650117735272

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.  
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11  
Full text of articles can be purchased from the editorial office.  
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11  
E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)