

УДК 539.3

Упругие и фрикционные свойства наноразмерных покрытий на основе дисульфида молибдена на микро и нано уровне

M.F. Wani¹, Ф.И. Степанов², Е.В. Торская², И.В. Шкалей²

¹Tribology Laboratory, Mechanical Engineering Department, National Institute of Technology, Hazratbal, Srinagar 190006, India

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия

Поступила в редакцию 21.06.2023.

После доработки 10.10.2023.

Принята к публикации 13.10.2023.

Наноиндентирование при температурах 23 и 150 °С используется для исследования покрытия из дисульфида молибдена, легированного серебром и фторидом кальция. Для экспериментов использовался сканирующий нанотвёрдомер «Наноскан-4D». Представлен метод определения упругих свойств покрытия по кривым упругого индентирования с учётом реальной формы головки индентора. На базе точного решения контактной задачи для двухслойного упругого основания определяется модуль упругости покрытия. Упругий характер индентирования обеспечивался при нагрузке 10 мН для обеих температур. Кривые нагружения-разгрузки при комнатной температуре и при 150 °С, оказались близкими, что доказывает стабильность упругих свойств в рассмотренном диапазоне температур. Расчётный модуль упругости покрытия составил 326 ГПа. С помощью этого же прибора определялся коэффициент трения скольжения покрытия при разных нагрузках (5, 10 и 20 мН). Подобное исследование можно считать физической моделью контакта покрытия с единичной неровностью. Эксперименты проводились на прямолинейных треках длиной 1 мм со скоростью 11 мкм/с. Показано, что покрытия являются антифрикционными (коэффициент трения от 0,033 до 0,078). Коэффициент трения возрастает с увеличением нагрузки, что может быть связано с диссипацией энергии на пластическое деформирование материала покрытия при относительно больших нагрузках. Вывод о наличии пластического деформирования основан на результатах оптического профилометрирования. При малых нагрузках это явление не наблюдается. Данное покрытие может быть использовано в узлах трения скольжения, предусматривающих одно-двукратное использование с низким коэффициентом трения.

Ключевые слова: наноиндентирование, трение, покрытия, контактная задача, нагрузка, профилометрирование.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

Адрес для переписки:

Е.В. Торская
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук,
Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: torskaya@mail.ru

Address for correspondence:

E.V. Torskaya
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy
of Sciences,
Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: torskaya@mail.ru

Для цитирования:

M.F. Wani, Ф.И. Степанов, Е.В. Торская, И.В. Шкалей
Упругие и фрикционные свойства наноразмерных покрытий на
основе дисульфида молибдена на микро и нано уровне.
Трение и износ.
2023. – Т. 44, № 5. – С. 435–445.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

For citation:

Mohammad Farooq Wani, F.I. Stepanov, E.V. Torskaya, and
I.V. Shkalei
[The Elastic and Frictional Properties of Nanoscale Coatings Based on
Molybdenum Disulfide at Micro and Nano Levels].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 5, pp. 435–445 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

The Elastic and Frictional Properties of Nanoscale Coatings Based on Molybdenum Disulfide at Micro and Nano Levels

Mohammad Farooq Wani¹, F.I. Stepanov², E.V. Torskaya², and I.V. Shkalei²

¹Tribology Laboratory, Mechanical Engineering Department, National Institute of Technology, Hazratbal, Srinagar 190006, India

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia

Received 21.06.2023.

Revised 10.10.2023.

Accepted 13.10.2023.

Abstract

Nanoindentation at temperatures of 23 and 150 °C is used to study the coating of molybdenum disulfide doped with silver and calcium fluoride. The scanning nanohardness tester “Nanoscan-4D” was used for the experiments. A method is presented for determining the elastic properties of a coating from elastic indentation curves, taking into account the real shape of the indenter head, which is determined by optical profilometry. The elasticity modulus of the coating is determined based on the exact solution of the contact problem for a two-layered elastic foundation, taking into account the calculated compliance of the measurement system. Newton method is used for the inverse problem solution. The input parameters of the problem, in addition to the geometry of the indenter head and the load, are the elastic properties of the head and substrate materials. The elastic type of indentation was provided at maximal load of 10 mN for both temperatures. The loading-unloading curves at room temperature and at 150 °C turned out to be close (within the experimental error), which proves the stability of the elastic properties in the considered temperature range. The calculated elastic modulus of the coating was 326 GPa. Using the same device, equipped with a lateral force sensor, the sliding friction coefficient of the coating was determined under different loads (5, 10, and 20 mN). Such a study can be considered as a physical model of the contact of the coating with a single asperity. The experiments were carried out on straight tracks 1 mm long at a speed of 11 μm/s. It is shown that the coatings are antifrictional (with friction coefficient is in range 0.033—0.078). The coefficient of friction increases with increasing load, which may be due to the dissipation of energy for plastic deformation of the coating material at relatively high loads. The conclusion about the presence of plastic deformation is based on the results of optical profilometry, which showed plastically deformed and pushed material along the edges of the friction track under relatively high loads. At low loads, this phenomenon is not observed. This coating can be used in sliding friction units that require one or two applications with a low friction coefficient.

Keywords: nanoindentation, friction, coatings, contact problem, load, profilometry,

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

Адрес для переписки:

Е.В. Торская
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского
Российской академии наук,
Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: torskaya@mail.ru

Address for correspondence:

E.V. Torskaya
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy
of Sciences,
Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: torskaya@mail.ru

Для цитирования:

М.Ф. Вани, Ф.И. Степанов, Е.В. Торская, И.В. Шкалей
Упругие и фрикционные свойства наноразмерных покрытий на основе
дисульфида молибдена на микро и нано уровне.
Трение и износ.
2023. – Т. 44, № 5. – С. 435–445.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

For citation:

Mohammad Farooq Wani, F.I. Stepanov, E.V. Torskaya, and
I.V. Shkalei
[The Elastic and Frictional Properties of Nanoscale Coatings Based on
Molybdenum Disulfide at Micro and Nano Levels].
Trenie i Iznos.

2023, vol. 44, no. 5, pp. 435–445 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-5-435-445

Список использованных источников

1. **Mufti T.A., Jan S.G., Wani M.F., and Sehgal R.** Development, Mechanical Characterization and High Temperature Tribological Evaluation of Magnetron Sputtered Novel MoS₂-CaF₂-Ag Coating for Aerospace Applications // *Tribology International*. — 2023 (182), 108374. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108374>
2. **Chicot D., Hage I., Demarecaux P., and Lesage J.** Elastic Properties Determination from Indentation Tests // *Surface and Coatings Technology*. — 1996 (81), 269—274. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02474-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02474-3)
3. **Bec S., Tonck A., and Loubet J.L.** A Simple Guide to Determine Elastic Properties of Films on Substrate from Nanoindentation Experiments // *Philosophical Magazine*. — 2006 (86), no. 33-35, 5347—5358. <https://doi.org/10.1080/14786430600660856>
4. **Chen J. and Bull S.J.** Modeling of Indentation Damage in Single and Multilayer Coatings Nanoindentation Experiments // *IUTAM Symposium on Modelling Nanomaterials and Nanosystems*. — 2008, 161—170
5. **Ghorbal G.B., Tricoteaux A., Thuault A., Ageorges H., Roudet F., and Chicot D.** Mechanical Properties of Thermally Sprayed Porous Alumina Coating by Vickers and Knoop Indentation // *Ceramics International*. — 2020 (46), no. 12, 19843—19851. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.039>
6. **Shuman D.J., Andrade M.S., and Costa A.** Calculating the Elastic Modulus from Nanoindentation and Microindentation Reload Curves // *Materials Characterization*. — 2007 (58), no. 4, 380—389. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.06.005>
7. **Горячева И.Г., Мышкин Н.К., Торская Е.В., Корнев Ю.В., Гуцев Д.М., Кудрицкий В.Г., Ковалева И.Н.** Моделирование фрикционного взаимодействия композиционных покрытий триботехнического назначения // *Трение и износ*. — 2012 (33), № 6, 557—565. <https://doi.org/10.3103/S1068366612060037>
8. **Aizikovich S., Krenev L., Sevostianov I., Trubchik I., and Evich L.** Evaluation of the Elastic Properties of a Functionally-Graded Coating from the Indentation Measurements // *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.* — 2011 (91), no. 6, 493—515. <https://doi.org/10.1002/zamm.201000179>
9. **Bredl J., Dany M., Schneider H.-C., and Kraft O.** Instrumented Indentation at Elevated Temperatures for Determination of Material Properties of Fusion Relevant Materials // *Nuclear Materials and Energy*. — 2016 (9), 502—507. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.09.011>
10. **Yonezu A., Akimoto H., Fujisawa S., and Chen X.** Spherical Indentation Method for Measuring Local Mechanical Properties of Welded Stainless Steel at High Temperature // *Materials & Design*. — 2013 (52), 812—820.

- <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.015>
11. **Степанов Ф.И., Торская Е.В.** Моделирование индентирования относительно жестких покрытий индентором произвольной формы // *Трение и износ*. — 2019 (40), № 4, 417—423. <https://doi.org/10.3103/S1068366619040147>
 12. **Кравчук К.С., Торская Е.В., Усеннов А.С., Фролов Н.Н.** Экспериментально-теоретическое исследование причин скальвания покрытий на основе многокомпонентных оксидов при фрикционном нагружении // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. — 2015 (1), 64—74. <https://doi.org/10.3103/S0025654415010069>
 13. **Beake B.D., McMaster S.J., Liskiewicz T.W., and Neville A.** Influence of Si- and W-Doping on Microscale Reciprocating Wear and Impact Performance of DLC Coatings on Hardened Steel // *Tribol. Int.* — 2021 (160), 107063. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107063>
 14. **Qi W., Huang P., Chen X., Jin J., and Luo J.** Achieving Controllable Friction of Ultrafinegrained Graphite HPG510 by Tailoring the Interfacial Nanostructures // *Appl. Surf. Sci.* — 2020 (512), 145731. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145731>
 15. <https://www.techsteel.net/alloy/steel/ams-5898>
 16. **Джонсон К.Л.** Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. — М.: Мир. — 1989

References

1. **Mufti T.A., Jan S.G., Wani M.F., and Sehgal R.** Development, Mechanical Characterization and High Temperature Tribological Evaluation of Magnetron Sputtered Novel MoS₂-CaF₂-Ag Coating for Aerospace Applications // *Tribology International*. — 2023 (182), 108374. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108374>
2. **Chicot D., Hage I., Demarecaux P., and Lesage J.** Elastic Properties Determination from Indentation Tests // *Surface and Coatings Technology*. — 1996 (81), 269—274. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02474-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02474-3)
3. **Bec S., Tonck A., and Loubet J.L.** A Simple Guide to Determine Elastic Properties of Films on Substrate from Nanoindentation Experiments // *Philosophical Magazine*. — 2006 (86), no. 33-35, 5347—5358. <https://doi.org/10.1080/14786430600660856>
4. **Chen J. and Bull S.J.** Modeling of Indentation Damage in Single and Multilayer Coatings Nanoindentation Experiments // *IUTAM Symposium on Modelling Nanomaterials and Nanosystems*. — 2008, 161—170
5. **Ghorbal G.B., Tricoteaux A., Thuault A., Ageorges H., Roudet F., and Chicot D.** Mechanical Properties of Thermally Sprayed Porous Alumina Coating by Vickers and Knoop Indentation // *Ceramics International*. — 2020 (46), no. 12, 19843—19851. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.039>

6. **Shuman D.J., Andrade M.S., and Costa A.** Calculating the Elastic Modulus from Nanoindentation and Microindentation Reload Curves // *Materials Characterization*. — 2007 (**58**), no. 4, 380—389. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.06.005>
7. **Goryacheva I.G., Torskaya E.V., Myshkin N.K., Gutsev D.M., Kudritskii V.G., Kovaleva I.N., and Kornev Y.V.** Modeling Friction of Tribological Composite Coatings // *Journal of Friction and Wear*. — 2012 (**33**), no. 6, 407—414. <https://doi.org/10.3103/S1068366612060037>
8. **Aizikovich S., Krenev L., Sevostianov I., Trubchik I., and Evich L.** Evaluation of the Elastic Properties of a Functionally-Graded Coating from the Indentation Measurements // *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.* — 2011 (**91**), no. 6, 493—515. <https://doi.org/10.1002/zamm.201000179>
9. **Bredl J., Dany M., Schneider H.-C., and Kraft O.** Instrumented Indentation at Elevated Temperatures for Determination of Material Properties of Fusion Relevant Materials // *Nuclear Materials and Energy*. — 2016 (**9**), 502—507. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.09.011>
10. **Yonezu A., Akimoto H., Fujisawa S., and Chen X.** Spherical Indentation Method for Measuring Local Mechanical Properties of Welded Stainless Steel at High Temperature // *Materials & Design*. — 2013 (**52**), 812—820. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.015>
11. **Stepanov F.I. and Torskaya E.V.** Modeling of Indentation of Hard Coatings by an Arbitrarily Shaped Indenter // *Journal of Friction and Wear*. — 2019 (**40**), no. 4, 326—331. <https://doi.org/10.3103/s1068366619040147>
12. **Kravchuk K.S., Useinov A.S., Torskaya E.V., and Frolov N.N.** Experimental and Theoretical Study of what Causes Spallation for Multicomponent Oxide-Based Coatings under Friction Loading // *Mechanics of Solids*. — 2015 (**50**), no. 1, 52—61. <https://doi.org/10.3103/S0025654415010069>
13. **Beake B.D., McMaster S.J., Liskiewicz T.W., and Neville A.** Influence of Si- and W-Doping on Microscale Reciprocating Wear and Impact Performance of DLC Coatings on Hardened Steel // *Tribol. Int.* — 2021 (**160**), 107063. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107063>
14. **Qi W., Huang P., Chen X., Jin J., and Luo J.** Achieving Controllable Friction of Ultrafinegrained Graphite HPG510 by Tailoring the Interfacial Nanostructures // *Appl. Surf. Sci.* — 2020 (**512**), 145731. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145731>
15. <https://www.techsteel.net/alloy/steel/ams-5898>
16. **Johnson K.L.** Contact mechanics. — Cambridge university press. — 1985

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