

УДК 544.032.2+535.378

Безызносное трение стали по стеклу в органических жидкостях и воде

Г.Ф. Павелко

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН,
Ленинский просп., д. 29, г. Москва 119991, Россия

Поступила в редакцию 08.08.2023.

После доработки 11.12.2023.

Принята к публикации 15.02.2024.

Рассмотрено безызносное трение стальных шариков ШХ-15 (ШХ) по поверхности ампул из кварцевого стекла (КС) и боросиликатного стекла (БС) в органических жидкостях и воде. Показано, что нельзя точно предсказать, какой материал будет изнашиваться быстрее: твёрдый или мягкий, шарик или подложка. Самая высокая корреляция износа сопряжённых поверхностей трения обнаружена для шариков и суммарного износа рабочих тел ($r \approx 1$). В группе стеклянных шариков шарики изнашиваются чаще (в 19 опытах из 21), чем в группе стальных шариков (в 5 опытах из 9). Безызносное трение чаще наблюдается в сопряжённых парах БС/ШХ (в 5 случаях), чем в парах КС/ШХ (в 1 случае). Сопряжённые поверхности, содержащие только одни концевые SiOH-группы, не обеспечивают безызносное граничное трение. Полезность работы заключается в том, что результаты исследований безызносного трения, полученные для сопряжённой пары ШХ/H₂O, могут найти практическое применение для создания подшипников и крупных суставов человека.

Ключевые слова: безызносность, сталь ШХ-15, кварцевое стекло, боросиликатное стекло, органические жидкости, трение, износ, вода.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

Адрес для переписки:

Г.Ф. Павелко
Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН,
Ленинский просп., д. 29, г. Москва 119991, Россия
e-mail: george.pavelko@gmail.com

Address for correspondence:

G.F. Pavelko
V.A. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian
Academy of Sciences,
Leninsky prospekt, 29, Moscow 119991, Russia
e-mail: george.pavelko@gmail.com

Для цитирования:

Г.Ф. Павелко
Безызносное трение стали по стеклу в органических жидкостях и воде.
Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 1. — С. 75–84.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

For citation:

G.F. Pavelko
[Wear-Free Friction of Steel on Glass in Organic Liquids and Water].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 1, pp. 75–84 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

Wear-Free Friction of Steel on Glass in Organic Liquids and Water

G.F. Pavelko

V.A. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences,
Leninsky prospekt, 29, Moscow 119991, Russia

Received 08.08.2023.

Revised 11.12.2023.

Accepted 15.02.2024.

Abstract

The wear-free friction of steel balls SHX-15 (ShKh) on the surface of quartz glass (QG) and borosilicate glass (BG) ampoules in organic liquids and water is considered. It is shown that it is impossible to accurately predict which material will wear faster: hard or soft, ball or substrate. The highest correlation of wear of mating friction surfaces was found for balls and total wear of working bodies ($r \approx 1$). In the group of glass balls, the balls wear out more often (in 19 experiments out of 21) than in the group of steel balls (in 5 experiments out of 9). Wear-free friction is more often observed in conjugated pairs of BG/ShKh (in 5 cases) than in pairs of QG/ShKh (in 1 case). Mating surfaces containing only one SiOH end group do not provide wear-free boundary friction. The usefulness of the work lies in the fact that the results of studies of wear-free friction obtained for the conjugated pair SH/H₂O can find practical application for the creation of bearings and large human joints.

Keywords: wearlessness, ShKh-15 steel, quartz glass, borosilicate glass, organic liquids, water.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

Адрес для переписки:

Г.Ф. Павелко
Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН,
Ленинский просп., д. 29, г. Москва 119991, Россия
e-mail: george.pavelko@gmail.com

Address for correspondence:

G.F. Pavelko
V.A. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian
Academy of Sciences,
Leninsky prospekt, 29, Moscow 119991, Russia
e-mail: george.pavelko@gmail.com

Для цитирования:

Г.Ф. Павелко
Безызносное трение стали по стеклу в органических жидкостях и воде.
Трение и износ.
2024. – Т. 45, № 1. – С. 75–84.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

For citation:

G.F. Pavelko
[Wear-Free Friction of Steel on Glass in Organic Liquids and Water].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 1, pp. 75–84 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-75-84

Список использованных источников

1. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В. Эффект безызносности // Открытие СССР № 41 от 11 ноября 1956 г.
2. Духовской Е.А., Онищенко В.С., Пономарев А.Н., Силин А.А., Тальрозе В.Л. Явление аномально низкого трения в вакууме // Открытие СССР № 121 от 16 сентября 1969 г.
3. Кужаров А.С. Концепция безызносности в современной трибологии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2014, № 2, 23—30
4. Малышев В.Н., Пичугин С.Д. Исследование изменений трущихся поверхностей в условиях эффекта безызносности // Современные наукоемкие технологии. — 2019, № 10-2, 273—279. <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37736>
5. Da Cruz M.G.A., Budnyak T.M., Rodrigues B.V.M., Budnyk S., and Slabon A. Biocoatings and Additives as Promising Candidates for Ultralow Friction Systems // Green Chemistry Letters and Reviews. — 2021 (14), no. 2, 358—381. DOI: 10.1080/17518253.2021.1921286
6. Мышкин Н.К., Григорьев А.Я. Зеленая трибология и устойчивое развитие // XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология — машиностроению», посвященная 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова. Сборник трудов конференции. 12—14 октября 2022 года. — 2022, 229—230
7. Roberts E.W. Ultralow Friction Films of MoS₂ for Space Applications // Thin Solid Films. — 1989 (181), no. 1—2, 461—473. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90515-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90515-4) Get rights and content
8. Erdemir A., Bindal C., and Fenske G.R. Formation of Ultralow Friction Surface Films on Boron Carbide // Appl. Phys. Lett. — 1996 (68), 1637—1639. <https://doi.org/10.1063/1.115676>
9. Erdemir A., Halter M., and Fenske G.R. Preparation of Ultralow-Friction Surface Films on Vanadium Diboride // Wear — 1997 (205), nos. 1-2, 236—239. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07508-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07508-4)
10. Zum Gahr K.-H. and Voelker K. Friction and Wear of SiC Fiber-Reinforced Borosilicate Glass Mated to Steel // Wear. — 1999 (225–229), 885—895. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00054-X)
11. Kano M., Yasuda Y., Okamoto Y., and Mabuchi Y. Ultralow Friction of DLC in Presence of Glycerol Mono-Oleate (GMO) // Tribology Letters. — 2005 (18), no. 2, 245—251. DOI: 10.1007/s11249-004-2749-4
12. Joly-Pottuz L., Dassenoy F., Belin M., Vacher B., Martin J.M., and Fleischer N. Ultralow-Friction and Wear Properties of IF-WS₂ under Boundary Lubrication // Tribology Letters. — 2005 (18), no. 4, 477—485. DOI: 10.1007/s11249-005-3607-8
13. De Barros Bouchet M.I., Matta C., Le-Mogne Th., et al. Superlubricity Mechanism of Diamond-Like Carbon with Glycerol // J. Phys.: Conf. Ser. — 2007 (89), 012003. doi:10.1088/1742-6596/89/1/012003
14. Makowski S., Schaller F., Weihnacht V., Englberger G., and Becker M. Tribochemical Induced Wear and Ultra-low Friction of Superhard ta-C Coatings // Wear. — 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.08.015>
15. Maksimkin A.V., Danilov V.D., Senatov F.S., Olifirov L.K., and Kaloshkin S.D. Wear Performance of Bulk Oriented Nanocomposites UHMWPE/FMWCNT and Metal-Polymer Composite Sliding Bearings // Wear. — 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.025>
16. Stoyanov P., Merz R., Stricker M., Kopnarski M., and Dienwiebel M. Achieving Ultra-Low Friction with Diamond/Metal Systems in Extreme Environments // Materials. — 2021 (14), 3791. <https://doi.org/10.3390/ma14143791>
17. Ferreira V., Yoshimura N.H., and Sinatora A. Ultra-Low Friction Coefficient in Alumina-Silicon Nitride Pair Lubricated with Water // Wear. — 2012 (296), 656—659. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.030>
18. Barthel A.J. and Kim S.H. Surface Chemistry Dependence of Water Adsorption on Solid Substrates in Humid Ambient and Humidity Effects on Wear of Copper and Glass Surfaces // Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces. — 2013 (7), no. 2, 63—68. DOI: 10.1179/1751584X13Y.0000000026
19. He H., Qian L., Pantano C.G., and Kim S.H. Effects of Humidity and Counter-Surface on Tribochemical Wear of Soda-Lime-Silica Glass // Wear. — 2015 (342–343), 100—106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.016>
20. Konicek A.R., Grierson D.S., Gilbert P.U.P.A., et al. Origin of Ultralow Friction and Wear in Ultrananocrystalline Diamond // PRL — 2008 (100), 235502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.235502
21. Ma L.R., Zhang C.H., and Liu S.H. Progress in Experimental Study of Aqueous Lubrication // Chin. Sci. Bull. — 2012 (57), 2062—2069. doi: 10.1007/s11434-012-5031-4
22. Chen Zhe, He Xin, Xiao Chen, and Kim S.H. Effect of Humidity on Friction and Wear — A Critical Review // Lubricants. — 2018 (6), 74. doi:10.3390/lubricants6030074
23. Hod O., Meyer E., Zheng Q., and Urbakh M. Structural Superlubricity and Ultralow Friction Across the Length Scales // Nature. — 2018 (563), 485—492
24. Reid E.E. Organic Chemistry of Bivalent Sulfur. — N.Y.: Chemical Publishing Co. — 1958 (I), 66
25. Reid E.E. Organic Chemistry of Bivalent Sulfur. — N.Y.: Chemical Publishing Co. — 1960 (III), 396
26. Воронков М.Г. Новый лабораторный метод получения абсолютного спирта // Изв. Латв. ССР. Сер. химическая. — 1963, № 2, 236.

- РЖХим. — 1964, 2Ж73
27. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/novye-razrabotki/119-opticheskoe-kvartsevoe-steklo>
 28. <https://pcgroup.ru/blog/steklo-simax-po-standartu-iso-3585>
 29. <https://rustaste.ru/tverdost-stali-po-moosu.html>
 30. Nakayama K. Triboemission, Tribochemical Reaction, and Friction and Wear in Ceramics under Various *n*-Butane Gas Pressures // *Tribol. Int.* — 1996 (29), no. 5, 385—393. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00077-H](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00077-H)
 31. Li H., Xu T., Wang Ch., Chen J., Zhou H., and Liu H. Friction-Induced Physical and Chemical Interactions Among Diamond-Like // *Diamond & Related Materials.* — 2006 (15), 1228—1234. doi:10.1016/j.diamond.2005.09.038
 32. Миддлтон М.Р. Анализ статистических данных Microsoft Excel для Office XP. — М.: Бином. Лаборатория знаний. — 2005

References

1. Garkunov D.N., Kragel'skij I.V. Effekt bezyznosnosti // *Otkrytie SSSR № 41* ot 11 noyabrya 1956 g. (in Russian)
2. Dukhovskoj E.A., Onishchenko V.S., Ponomarev A.N., Silin A.A., Tal'roze V.L. Yavlenie anomal'no nizkogo treniya v vakuume // *Otkrytie SSSR № 121* ot 16 sentyabrya 1969 g. (in Russian)
3. Kuzharov A.S. Konepciya bezyznosnosti v sovremennoj tribologii // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki.* — 2014, № 2, 23—30 (in Russian)
4. Malyshev V.N., Pichugin S.D. Issledovanie izmenenij trushchikhsya poverkhnostej v usloviyakh effekta bezyznosnosti // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* — 2019, № 10-2, 273—279. <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37736> (in Russian)
5. Da Cruz M.G.A., Budnyak T.M., Rodrigues B.V.M., Budnyk S., and Slabon A. Biocoatings and Additives as Promising Candidates for Ultralow Friction Systems // *Green Chemistry Letters and Reviews.* — 2021 (14), no. 2, 358—381. DOI: 10.1080/17518253.2021.1921286
6. Myshkin N.K., Grigor'ev A.Ya. Zelenaya tribologiya i ustojchivoe razvitie // XIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Tribologiya — mashinostroeniye», posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.P. Semyonova. *Sbornik trudov konferencii.* 12—14 oktyabrya 2022 goda. — 2022, 229—230 (in Russian)
7. Roberts E.W. Ultralow Friction Films of MoS₂ for Space Applications // *Thin Solid Films.* — 1989 (181), no. 1—2, 461—473. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90515-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90515-4) Get rights and content
8. Erdemir A., Bindal C., and Fenske G.R. Formation of Ultralow Friction Surface Films on Boron

- Carbide // *Appl. Phys. Lett.* — 1996 (68), 1637—1639. <https://doi.org/10.1063/1.115676>
9. Erdemir A., Halter M., and Fenske G.R. Preparation of Ultralow-Friction Surface Films on Vanadium Diboride // *Wear* — 1997 (205), nos. 1-2, 236—239. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07508-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07508-4)
 10. Zum Gahr K.-H. and Voelker K. Friction and Wear of SiC Fiber-Reinforced Borosilicate Glass Mated to Steel // *Wear.* — 1999 (225–229), 885—895. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00054-X)
 11. Kano M., Yasuda Y., Okamoto Y., and Mabuchi Y. Ultralow Friction of DLC in Presence of Glycerol Mono-Oleate (GMO) // *Tribology Letters.* — 2005 (18), no. 2, 245—251. DOI: 10.1007/s11249-004-2749-4
 12. Joly-Pottuz L., Dassenoy F., Belin M., Vacher B., Martin J.M., and Fleischer N. Ultralow-Friction and Wear Properties of IF-WS₂ under Boundary Lubrication // *Tribology Letters.* — 2005 (18), no. 4, 477—485. DOI: 10.1007/sl1249-005-3607-8
 13. De Barros Bouchet M.I., Matta C., Le-Mogne Th., et al. Superlubricity Mechanism of Diamond-Like Carbon with Glycerol // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2007 (89), 012003. doi:10.1088/1742-6596/89/1/012003
 14. Makowski S., Schaller F., Weihnacht V., Englberger G., and Becker M. Tribochemical Induced Wear and Ultra-low Friction of Superhard ta-C Coatings // *Wear.* — 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.08.015>
 15. Maksimkin A.V., Danilov V.D., Senatov F.S., Olifirov L.K., and Kaloshkin S.D., Wear Performance of Bulk Oriented Nanocomposites UHMWPE/FMWCNT and Metal-Polymer Composite Sliding Bearings // *Wear.* — 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.025>
 16. Stoyanov P., Merz R., Stricker M., Kopnarski M., and Dienwiebel M. Achieving Ultra-Low Friction with Diamond/Metal Systems in Extreme Environments // *Materials.* — 2021 (14), 3791. <https://doi.org/10.3390/ma14143791>
 17. Ferreira V., Yoshimura N.H., and Sinatora A. Ultra-Low Friction Coefficient in Alumina-Silicon Nitride Pair Lubricated with Water // *Wear.* — 2012 (296), 656—659. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.030>
 18. Barthel A.J. and Kim S.H. Surface Chemistry Dependence of Water Adsorption on Solid Substrates in Humid Ambient and Humidity Effects on Wear of Copper and Glass Surfaces // *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces.* — 2013 (7), no. 2, 63—68. DOI: 10.1179/1751584X13Y.0000000026
 19. He H., Qian L., Pantano C.G., and Kim S.H. Effects of Humidity and Counter-Surface on Tribochemical Wear of Soda-Lime-Silica Glass // *Wear.* — 2015 (342–343), 100—106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.016>
 20. Konicek A.R., Grierson D.S., Gilbert P.U.P.A., et

- all.** Origin of Ultralow Friction and Wear in Ultrananocrystalline Diamond // PRL — 2008 (**100**), 235502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.235502
21. **Ma L.R., Zhang C.H., and Liu S.H.** Progress in Experimental Study of Aqueous Lubrication // Chin. Sci. Bull. — 2012 (**57**), 2062—2069. doi: 10.1007/s11434-012-5031-4
22. **Chen Zhe, He Xin, Xiao Chen, and Kim S.H.** Effect of Humidity on Friction and Wear — A Critical Review // Lubricants. — 2018 (**6**), 74. doi:10.3390/lubricants6030074
23. **Hod O., Meyer E., Zheng Q., and Urbakh M.** Structural Superlubricity and Ultralow Friction Across the Length Scales // Nature. — 2018 (**563**), 485—492
24. **Reid E.E.** Organic Chemistry of Bivalent Sulfur. — N.Y.: Chemical Publishing Co. — 1958 (**I**), 66
25. **Reid E.E.** Organic Chemistry of Bivalent Sulfur. — N.Y.: Chemical Publishing Co. — 1960 (**III**), 396
26. **Voronkov M.G.** Novyj laboratornyj metod polucheniya absolyutirovannogo spirta // Izv. Latv. SSR. Ser. khimicheskaya. — 1963, № 2, 236. RZHKhim. — 1964, 2ZH73 (in Russian)
27. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/novye-razrabotki/119-opticheskoe-kvartsevoe-steklo>
28. <https://pcgroup.ru/blog/steklo-simax-po-standartu-iso-3585>
29. <https://rustaste.ru/tverdost-stali-po-moosu.html>
30. **Nakayama K.** Triboemission, Tribochemical Reaction, and Friction and Wear in Ceramics under Various *n*-Butane Gas Pressures // Tribol. Int. — 1996 (**29**), no. 5, 385—393. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00077-H](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00077-H)
31. **Li H., Xu T., Wang Ch., Chen J., Zhou H., and Liu H.** Friction-Induced Physical and Chemical Interactions Among Diamond-Like // Diamond & Related Materials. — 2006 (**15**), 1228—1234. doi:10.1016/j.diamond.2005.09.038
32. **Midlton M.R.** Analiz statisticheskikh dannykh Microsoft Excel dlya Office XP. — M.: Binom. Laboratoriya znaniy. — 2005 (in Russian)

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@mpri.org.by