

УДК 621.892

Молекулярные механизмы изнашивания полиоксиметилена

А.О. Поздняков^{1,3}, Ли Сяньшунь², Е.Б. Седакова³

¹ФГБУН Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург 194021, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Россия

³Институт проблем машиноведения РАН,
В.О. Большой просп., д. 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

Поступила в редакцию 08.09.2023.

После доработки 08.02.2024.

Принята к публикации 15.02.2024.

Исследованы трение и износ полиоксиметилена относительно полиоксиметилена и полиэфирэфиркетона. Показано, что в гомогенной паре трения полиоксиметилена-полиоксиметилена износ экспоненциально возрастает при увеличении контактного давления и скорости скольжения. В гетерогенной паре трения полиэфирэфиркетон-полиоксиметилена изнашивание полиоксиметилена существенно ниже и мало зависит от скорости скольжения и давления на контакте. Методом масс-спектрометрии показано, что в паре трения полиэфирэфиркетон-полиоксиметилена образование продуктов трибодеструкции макромолекул не наблюдается, в отличие от термодинамически совместимой пары полиоксиметилена-полиоксиметилена. В паре полиоксиметилена-полиоксиметилена продукты трибодеструкции полиоксиметилена регистрируются, причём кинетика их образования прямо коррелирует с ростом силы трения уже при мощности трения на уровне 10^{-2} МПа·м/с. Различия в износе проинтерпретированы как следствие взаимопроникновения макромолекул через границу раздела пары полиоксиметилена-полиоксиметилена и их разрывов в поле сдвига. Термоактивированное взаимопроникновение макромолекул визуализировано методом молекулярной динамики. Разработанный подход и получаемые им результаты будут полезны для детального исследования молекулярных механизмов трения и изнашивания практически используемых полимеров и их композитов.

Ключевые слова: полимер, пара трения, сила трения, износостойкость, вакуум, масс-спектрометрия, пластические деформации, температура в зоне трения, полиоксиметилена, полиэфирэфиркетон, температура стеклования, молекулярная динамика, термодинамическая совместимость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

Адрес для переписки:

А.О. Поздняков
ФГБУН Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург 194021, Россия;
Институт проблем машиноведения РАН,
В.О. Большой просп., д. 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия
e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Address for correspondence:

A.O. Pozdnyakov
Ioffe Institute,
Polytechnicheskaya str., 26, Saint-Petersburg 194021, Russia;
Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian
Academy of Sciences,
Bolshoy prospect V.O., d.61, Saint-Petersburg 199178, Russia
e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Для цитирования:

А.О. Поздняков, Ли Сяньшунь, Е.Б. Седакова.
Молекулярные механизмы изнашивания полиоксиметилена.
Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 1. — С. 38–48.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

For citation:

A.O. Pozdnyakov, Li Syanshun, and E.B. Sedakova.
[Molecular Mechanisms of Polyoxymethylene Wear].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 1, pp. 38–48 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

Molecular Mechanisms of Polyoxymethylene Wear

A.O. Pozdnyakov^{1,3}, Li Syanshun², and E.B. Sedakova³

¹Ioffe Institute,
Polytechnicheskaya str., 26, Saint-Petersburg 194021, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Polytechnicheskaya str., 29, Saint-Petersburg 195251, Russia

³Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
Bolshoy prospect V.O., d.61, Saint-Petersburg 199178, Russia

Received 08.09.2023.

Revised 08.02.2024.

Accepted 15.02.2024.

Abstract

Friction and wear of polyoxymethylene upon friction against polyoxymethylene and polyetheretherketone have been analyzed. It is shown that wear exponentially increases upon growth of contact pressure and sliding velocity in the homogeneous friction pair polyoxymethylene-polyoxymethylene. In the heterogeneous pair polyetheretherketone-polyoxymethylene the wear of POM is small and exhibits no registered dependence on sliding velocity and contact pressure. Mass-spectrometric analysis shows that the macromolecular decomposition products are not detected for polyetheretherketone-polyoxymethylene pair. However, for thermodynamically compatible polyoxymethylene-polyoxymethylene pair their formation, accompanied by the growth of friction force, is detected at the levels of friction power as low as 10^{-2} MPa·m/s. These differences have been interpreted to result from interpenetration of polyoxymethylene macromolecules and their rupture in the shear field at the homogeneous polyoxymethylene-polyoxymethylene friction interface, absent in polyetheretherketone-polyoxymethylene pair. Thermally activated interpenetration of macromolecules for polyoxymethylene-polyoxymethylene pair and its absence in polyetheretherketone-polyoxymethylene pair has been visualized by means of molecular dynamics calculations. The experimental approach and the results of its application will be useful in detailed studies of molecular level friction mechanisms of friction and wear of industrially used polymers and their composites.

Keywords: polymer, friction pair, friction force, wear resistance, vacuum, mass-spectrometry, plastic deformations, temperature in friction zone, polyoxymethylene, polyetheretherketone, glass transition temperature, molecular dynamics, thermodynamic compatibility.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

Адрес для переписки:

А.О. Поздняков
ФГБУН Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург 194021, Россия;
Институт проблем машиноведения РАН,
В.О. Большой просп., д. 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия
e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Address for correspondence:

A.O. Pozdnyakov
Ioffe Institute,
Polytechnicheskaya str., 26, Saint-Petersburg 194021, Russia;
Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian
Academy of Sciences,
Bolshoy prospect V.O., d.61, Saint-Petersburg 199178, Russia
e-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

Для цитирования:

А.О. Поздняков, Ли Сяньшунь, Е.Б. Седакова.
Молекулярные механизмы изнашивания полиоксиметилена.
Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 1. — С. 38—48.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

For citation:

A.O. Pozdnyakov, Li Syanshun, and E.B. Sedakova.
[Molecular Mechanisms of Polyoxymethylene Wear].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 1, pp. 38—48 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-38-48

Список использованных источников

1. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка и износ: физические основы и технические приложения трибологии. — Москва: Физматлиб. — 2007
2. **Bin-Bin Jia, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong, and Tong-Sheng Li.** An Investigation on the Relationships between Cohesive Energy Density and Tribological Properties for Polymer-Polymer Sliding Combinations // *Wear*. — 2008 (**264**), nos. 7-8, 685—692. DOI: 10.1016/j.wear.2007.06.004
3. **Laux K.A. and Schwartz C.J.** Effects of Contact Pressure, Molecular Weight, and Supplier on the Wear Behavior and Transfer Film of Polyetheretherketone (PEEK) // *Wear*. — 2013 (**297**), nos. 1–2, 919—925. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.013
4. **Sivebaek I.M., Samoilov V.N., and Persson B.N.J.** Frictional Properties of Confined Polymers // *Eur. Phys. J.* — 2008, no. 27, 37—46. DOI: 10.1140/epje/i2008-10349-8
5. **Поздняков А.О.** Образование продуктов деградации макромолекул при трении полимера по полимеру // *Письма ЖТФ*. — 2023 (**49**), № 10, 17—20. DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55428.19537
6. **Eds. Friedrich K. and Schlarb A.K.,** *Tribology of Polymeric Nanocomposites (First Edition)*. — Butterworth-Heinemann. — 2008
7. **Поздняков А.О., Чернышов М.И., Семенча А.В., Николаев В.И., Кобычно И.А., Фадин Ю.А.** Прибор для регистрации параметров трения // *Изв. вузов. Приборостроение*. — 2020 (**63**), № 10, 950—955. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-950-955
8. **Седакова Е.Б., Козырев Ю.П.,** Влияние фрикционного переноса в паре трения полимер-сталь на трибологические свойства политетрафторэтилена при разных контактных температурах // *Вестник машиностроения*. — 2017, № 7, 45—47
9. **Persson B.N.J.** *Sliding Friction, Phys. Principles and Applications*, 2nd ed. — Springer. — 2000
10. **Brandrup J., Immergut E.H., and Grulke E.A.** *Polymer Handbook*, 2 Volumes Set, 4th ed. — J. Wiley and Sons. — 1989
11. **Conte M., Pinedo B., and Igartua A.** Frictional Heating Calculation Based on Tailored Experimental Measurements // *Tribology International*. — 2014 (**74**), 1—6. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.01.020
12. **Mergler Y.J., Schaake R.P., and Huis in't Veld A.J.,** Material Transfer of POM in Sliding Contact // *Wear*. — 2004 (**256**), nos. 3-4, 294—301. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00410-1
13. **Samyn P., and De Baets P.** Friction and Wear of Acetal: A Matter of Scale // *Wear*. — 2005 (**259**), 697—702. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.055
14. **Поздняков А.О., Гинзбург Б.М., Лишевич И.В., Попов Е.О., Поздняков О.Ф.** Масс-спектрометрические исследования трения полимеров // *Вопросы Материаловедения*. — 2013, № 4(72), 265—274
15. **Sawada H.** *Thermodynamics of Polymerization*. — New York: Marcel Dekker. — 1976
16. **Rigby D., Sun H., and Eichinger B.E.** Computer Simulations of Poly (Ethylene Oxide): Force Field, PVT Diagram and Cyclization Behaviour // *Polymer International*. — 1997 (**44**), 311—330. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0126(199711)44:3<311::AID-PI880>3.0.CO;2-H
17. **Привалко В.П.** О температуре стеклования политетрафторэтилена и полиоксиметилена // *Высокомолекуляр. соединения А*. — 1976 (**18**), № 6, 1213
18. **Li S. and Sedakova E.B.** Application of Molecular Dynamic Modeling to Study the Structural Changes During Adhesive Wear of Polytetrafluoroethylene and Its Composite // In: Evgrafov A.N. (Ed.) *Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Springer, Cham. — 2022, 70—77. DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7_8
19. **Islam K., Saha S., and Masud A.K.M.** Molecular Dynamics Simulation of the Mechanical Properties of CNT-Polyoxymethylene Composite with a Reactive Force Field // *J. Molecular Simulation*. — 2020 (**46**), no. 5, 380—387. DOI: 10.1080/08927022.2020.1711904
20. **Chen N., Maeda N., Tirrell M., and Israela-chvili J.** Adhesion and Friction of Polymer Surfaces: The Effect of Chain Ends // *Macromolecules*. — 2005 (**38**), no. 8, 3491—3503. DOI: 10.1021/ma047733e

References

1. **Myshkin N.K., Petrokovec M.I.** *Trenie, smazka i iznos: fizicheskie osnovi i technicheskie prilozheniya tribologii*. — Moskva: Fizmatlib. — 2007 (in Russian)
2. **Bin-Bin Jia, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong, and Tong-Sheng Li.** An Investigation on the Relationships between Cohesive Energy Density and Tribological Properties for Polymer-Polymer Sliding Combinations // *Wear*. — 2008 (**264**), nos. 7-8, 685—692. DOI: 10.1016/j.wear.2007.06.004
3. **Laux K.A. and Schwartz C.J.** Effects of Contact Pressure, Molecular Weight, and Supplier on the Wear Behavior and Transfer Film of Polyetheretherketone (PEEK) // *Wear*. — 2013 (**297**), nos. 1–2, 919—925. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.013
4. **Sivebaek I.M., Samoilov V.N., and Persson B.N.J.** Frictional Properties of Confined Polymers // *Eur. Phys. J.* — 2008, no. 27, 37—46. DOI: 10.1140/epje/i2008-10349-8
5. **Pozdnyakov A.O.** Formation of Decomposition Products of Macromolecules upon Friction of Polymer Against Polymer // *Technical Physics Letters*. — 2023 (**49**), no. 5, 56—59. DOI: 10.21883/TPL.2023.05.56030.19537
6. **Eds. Friedrich K. and Schlarb A.K.,** *Tribology of Polymeric Nanocomposites (First Edition)*. — Butterworth-Heinemann. — 2008

7. **Pozdnyakov A.O., Chernyshov M.I., Semench A.V., Nikolaev V.I., Kobichno I.A., Fadin Yu.A.** Pribor dlya registracii parametrov terniya // *Izv. Vyzov. Priborostroenie*. — 2020 (**63**), № 10, 950—955. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-950-955 (in Russian)
8. **Sedakova E.B., Kozyrev Yu.P.** Vliyanie frikcionnogo perenosa v pare treniya polymer-stal' na tribologicheskie svoistva polytetraftoretylena pri raznih kontaktnih temperaturah // *Vestnik Mashinostroeniya*. — 2017, № 7, 45—47 (in Russian)
9. **Persson B.N.J.** Sliding Friction, Phys. Principles and Applications, 2nd ed. — Springer. — 2000
10. **Brandrup J., Immergut E.H., and Grulke E.A.** Polymer Handbook, 2 Volumes Set, 4th ed. — J. Wiley and Sons. — 1989
11. **Conte M., Pinedo B., and Igartua A.** Frictional Heating Calculation Based on Tailored Experimental Measurements // *Tribology International*. — 2014 (**74**), 1—6. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.01.020
12. **Mergler Y.J., Schaafe R.P., and Huis in't Veld A.J.** Material Transfer of POM in Sliding Contact // *Wear*. — 2004 (**256**), nos. 3-4, 294—301. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00410-1
13. **Samyn P., and De Baets P.** Friction and Wear of Acetal: A Matter of Scale // *Wear*. — 2005 (**259**), 697—702. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.055
14. **Pozdnyakov A.O., Ginzburg B.M., Lishevich I.V., Popov E.O., Pozdnyakov O.F.** Mass-spektricheskie isslefovaniya treniya polymerov // *Vo-prosi Materialovedeniya*. — 2013, № 4(72), 265—274 (in Russian)
15. **Sawada H.** Thermodynamics of Polymerization. — New York: Marcel Dekker. — 1976
16. **Rigby D., Sun H., and Eichinger B.E.** Computer Simulations of Poly (Ethylene Oxide): Force Field, PVT Diagram and Cyclization Behaviour // *Polymer International*. — 1997 (**44**), 311—330. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0126(199711)44:3<311::AID-PI880>3.0.CO;2-H
17. **Privalko V.P.** O temperature steklovaniya polytetraftoretylena i polyoksimetilena // *Visokomolekulyar. Soed., A*. — 1976 (**18**), № 6, 1213 (in Russian)
18. **Li S. and Sedakova E.B.** Application of Molecular Dynamic Modeling to Study the Structural Changes During Adhesive Wear of Polytetrafluoroethylene and Its Composite // In: Evgrafov A.N. (Ed.) *Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Springer, Cham. — 2022, 70—77. DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7_8
19. **Islam K., Saha S., and Masud A.K.M.** Molecular Dynamics Simulation of the Mechanical Properties of CNT-Polyoxymethylene Composite with a Reactive Force Field // *J. Molecular Simulation*. — 2020 (**46**), no. 5, 380—387. DOI: 10.1080/08927022.2020.1711904
20. **Chen N., Maeda N., Tirrell M., and Israelevili J.** Adhesion and Friction of Polymer Surfaces: The Effect of Chain Ends // *Macromolecules*. — 2005 (**38**), no. 8, 3491—3503. DOI: 10.1021/ma047733e

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