

УДК 539.621:691.175.664

## Влияние поверхностной ионно-плазменной обработки на триботехнические характеристики полиуретана

И.В. Шкалей, 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

Поступила в редакцию 28.06.2023.

После доработки 04.08.2023.

Принята к публикации 10.08.2023.

Приведено экспериментальное исследование и анализ влияния поверхностной обработки, приводящей к образованию карбонизированных слоёв, на коэффициент трения скольжения двух полиуретановых материалов, отличающихся механическими и реологическими свойствами. Свойства определялись по результатам индентирования на сканирующем нанотвёрдомере «НаноСкан-4D». В качестве индентора использовался керамический шарик диаметром 2,1 мм, который вдавливался в образцы с заданной линейной скоростью. Кривые индентирования при малой и большой скоростях вдавливания были использованы для расчёта длительного и мгновенного приведённого модуля упругости. Получено, что длительные модули упругости отличаются более, чем в семь раз, а реологические свойства более жёсткого материала проявляются слабо. Трибологические испытания проводились на машине трения УМТ-3 в режиме однонаправленного трения скольжения при постоянных нагрузке и скорости. На основе полученных данных были рассчитаны уравнения регрессии и построена зависимость коэффициента трения от нагрузки и скорости скольжения. Проведён анализ влияния флюенса поверхностной обработки на шероховатость поверхности, адгезионную и деформационную силы трения, данные соотнесены с известными экспериментальными и теоретическими результатами. Показано, что обработка с относительно малым флюенсом даёт принципиально разные эффекты для двух изучаемых материалов: слабое изменение шероховатости и падение коэффициента трения для более жёсткого полиуретана; существенный рост шероховатости и стабильно высокий коэффициент трения, слабо меняющийся в рассмотренных диапазонах нагрузок и скоростей. Таким образом, поверхностная обработка может быть использована как средство управления коэффициентом трения полиуретана и обеспечения его стабильно высоких фрикционных свойств.

**Ключевые слова:** трение, полиуретан, карбонизированный слой, индентирование, приведенный модуль упругости, шероховатость.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

---

**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,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: torskaya@mail.ru

**Для цитирования:**

И.В. Шкалей, Е.В. Торская  
Влияние поверхностной ионно-плазменной обработки на  
триботехнические характеристики полиуретана.  
Трение и износ.  
2023. — Т. 44, № 4. — С. 376–384.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

**For citation:**

I.V. Shkalei and E.V. Torskaya  
[Effect of Ion-Plasma Surface Treatment on Tribological  
Characteristics of Polyurethane].  
*Trenie i Iznos*.  
2023, vol. 44, no. 4, pp. 376–384 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

# Effect of Ion-Plasma Surface Treatment on Tribological Characteristics of Polyurethane

I.V. Shkalei and E.V. Torskaya

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia*

Received 28.06.2023.

Revised 04.08.2023.

Accepted 10.08.2023.

## Abstract

The aim of this study is an experimental-based analysis of the effect of surface treatment, leading to the formation of carbonized layers, on the coefficient of sliding friction of two polyurethane materials that differ in mechanical and rheological properties. The properties were determined by the results of indentation on a scanning nanohardness tester "NanoScan-4D". A ceramic ball with a diameter of 2.1 mm was used as an indenter, which was pressed into the samples at a given linear velocity. The indentation curves at low and high indentation velocities were used to calculate the longitudinal and instantaneous reduced modulus of elasticity. It was found that the longitudinal elastic moduli differ by more than seven times, and the rheological properties of a more rigid material are weak. Tribological tests were performed on a UMT-3 friction machine in the mode of unidirectional sliding friction at a constant load and velocity. Based on the data obtained, regression equations were calculated and the dependences of the friction coefficient on the load and sliding velocity were obtained. The influence of the surface treatment fluence on the surface roughness, adhesion and deformation friction force is analyzed, data are correlated with the known experimental and theoretical results. It is shown that surface treatment with a relatively small fluence gives fundamentally different effects for the two studied materials: a slight change in roughness and decrease of friction coefficient for the more rigid polyurethane; a significant increase in roughness and a consistently high coefficient of friction, which varies slightly in the considered ranges of loads and velocities. Thus, surface treatment can be used for controlling the coefficient of friction of polyurethane and ensuring its consistently high frictional properties.

**Keywords:** friction, polyurethane, carbonized layer, indentation, reduced modulus of elasticity, roughness.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

---

### 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,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: torskaya@mail.ru

---

### Для цитирования:

И.В. Шкалей, Е.В. Торская  
Влияние поверхностной ионно-плазменной обработки на  
триботехнические характеристики полиуретана.  
Трение и износ.  
2023. — Т. 44, № 4. — С. 376–384.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

### For citation:

I.V. Shkalei and E.V. Torskaya  
[Effect of Ion-Plasma Surface Treatment on Tribological  
Characteristics of Polyurethane].  
*Trenie i Iznos*.  
2023, vol. 44, no. 4, pp. 376–384 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384

## Список использованных источников

1. **Кислицын В.Д., Шадрин В.В., Осоргина И.В., Свистков А.Л.** Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологиям // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. — 2020, № 1, 17—25
2. **Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Свистков А.Л., Кондюрин А.В.** Polyurethane modified by plasma ion implantation // NANOCON 2018 – Conference Proceedings, TANGER Ltd., Ostrava. — 2019, 295—299
3. **Torskaya E.V., Stepanov F.I., Tsukanov I.Y., and Shkalei I.V.** Sliding Contact of Coated Viscoelastic Solids: Model and Experiment // Journal of Physics: Conference Series. VI International Conference “Topical Problems of Continuum Mechanics”. — 2020, 012033
4. **Hausberger A., Major Z., Theiler G., and Gradt T.** Observation of the Adhesive- and Deformation- Contribution to the Friction and Wear Behaviour of Thermoplastic Polyurethanes // Wear. — 2018 (412–413), 14—22
5. **Sato S., Yamaguchi T., Shibata K., Nishi T., Moriyasu K., Harano K., and Hokkirigawa K.** Dry Sliding Friction and Wear Behavior of Thermoplastic Polyurethane Against Abrasive Paper // Biotribology. — 2020 (23), 100130
6. **Erik G. de Vries, Branco S. van Minnen, Yinglei Wu, David T.A. Matthews, and Emile van der Heide.** Tribological Behaviour of a Synthetic Synovial Fluid and Polyurethane in Biomedical Implants // Biotribology. — 2023 (33–34), 100242
7. **Джонсон К.Л.** Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. — М.: Мир. — 1989
8. **Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н.** Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. — 2020 (41), № 4, 448—456
9. **Fuller K.N.G. and Tabor D.** The Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids // Proc. R. Soc. Lond. — 1975 (A 345), 327—342
10. **Purtov J., Gorb E.V., Steinhart M., and Gorb S.N.** Measuring of the Hardly Measurable: Adhesion Properties of Anti-Adhesive Surfaces // Appl. Phys. A. — 2013 (111), no. 1, 183—189
11. **Guduru, P.R.** Detachment of a Rigid Solid from an Elastic Wavy Surface: Theory // J. Mech. Phys. Solids. — 2007 (55), no. 3, 445—472
12. **Kesari H. and Lew A.J.** Effective Macroscopic Adhesive Contact Behavior Induced by Small Surface Roughness // J. Mech. Phys. Solids. — 2011 (59), no. 12, 2488—2510
13. **Goryacheva I. and Makhovskaya Y.** Adhesion Effect in Sliding of a Periodic Surface and an Individual Indenter upon a Viscoelastic Base // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. — 2016 (51), no. 4, 286—293
14. **Морозов А.В., Маховская Ю.Ю.** Теоретико-экспериментальная оценка деформационной составляющей коэффициента трения // Трение и износ. — 2007 (28), № 4, 335—344
15. **Torskaya E.V. and Stepanov F.I.** Effect of Surface Layers in Sliding Contact of Viscoelastic Solids (3-d Model of Material) // Frontiers in Mechanical Engineering. — 2019 (5), 26

## References

1. **Kislitsyn V.D., Shadrin V.V., Osorgina I.V., Svistkov A.L.** Analysis of the mechanical properties of polyurethane materials manufactured by mortar and injection technology // Bulletin of Perm University. Physics. — 2020 (1), 17—25 (in Russian)
2. **Chudinov V.S., Shardakov I.N., Svistkov A.L., and Kondyurin A.V.** Polyurethane Modified by Plasma Ion Implantation // NANOCON 2018 – Conference Proceedings, TANGER Ltd., Ostrava. — 2019, 295—299
3. **Torskaya E.V., Stepanov F.I., Tsukanov I.Y., and Shkalei I.V.** Sliding Contact of Coated Viscoelastic Solids: Model and Experiment // Journal of Physics: Conference Series. VI International Conference “Topical Problems of Continuum Mechanics”. — 2020, 012033
4. **Hausberger A., Major Z., Theiler G., and Gradt T.** Observation of the Adhesive- and Deformation- Contribution to the Friction and Wear Behaviour of Thermoplastic Polyurethanes // Wear. — 2018 (412–413), 14—22
5. **Sato S., Yamaguchi T., Shibata K., Nishi T., Moriyasu K., Harano K., and Hokkirigawa K.** Dry Sliding Friction and Wear Behavior of Thermoplastic Polyurethane Against Abrasive Paper // Biotribology. — 2020 (23), 100130
6. **Erik G. de Vries, Branco S. van Minnen, Yinglei Wu, David T.A. Matthews, and Emile van der Heide.** Tribological Behaviour of a Synthetic Synovial Fluid and Polyurethane in Biomedical Implants // Biotribology. — 2023 (33–34), 100242
7. **Johnson K.L.** Contact Mechanics. — Cambridge University Press. — 1985
8. **Bukovskiy P.O., Morozov A.V., and Kirichenko A.N.** Influence of Running-In on the Friction Coefficient of C/C Composite Materials for Aircraft Brakes // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), no. 4, 326—332
9. **Fuller K.N.G. and Tabor D.** The Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids // Proc. R. Soc. Lond. — 1975 (A 345), 327—342
10. **Purtov J., Gorb E.V., Steinhart M., and Gorb S.N.** Measuring of the Hardly Measurable: Adhesion Properties of Anti-Adhesive Surfaces // Appl. Phys. A. — 2013 (111), no. 1, 183—189
11. **Guduru, P.R.** Detachment of a Rigid Solid from an Elastic Wavy Surface: Theory // J. Mech. Phys. Solids. — 2007 (55), no. 3, 445—472

12. **Kesari H. and Lew A.J.** Effective Macroscopic Adhesive Contact Behavior Induced by Small Surface Roughness // *J. Mech. Phys. Solids*. — 2011 (**59**), no. 12, 2488—2510
13. **Goryacheva I. and Makhovskaya Y.** Adhesion Effect in Sliding of a Periodic Surface and an Individual Indenter upon a Viscoelastic Base // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. — 2016 (**51**), no. 4, 286—293
14. **Morozov A.V. and Makhovskaya Yu.Yu.** Experimental and Theoretical Evaluation of the Deformation Component of the Coefficient of Friction // *Journal of Friction and Wear*. — 2007 (**28**), no. 4, 331—337
15. **Torskaya E.V. and Stepanov F.I.** Effect of Surface Layers in Sliding Contact of Viscoelastic Solids (3-d Model of Material) // *Frontiers in Mechanical Engineering*. — 2019 (**5**), 26

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)