

УДК 678.073:661.481

## Оптимальный выбор материалов для полимер-полимерных эндопротезов по трибологическим критериям

С.В. Панин<sup>1,2</sup>, В.О. Алексенко<sup>1</sup>, Д.Г. Буслович<sup>1</sup>, Л.А. Корниенко<sup>1</sup>, А.В. Бяков<sup>1</sup>,  
Б.А. Люкшин<sup>1,3</sup>, С.В. Шилько<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

<sup>2</sup>Томский политехнический университет,  
просп. Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
просп. Ленина, 40, г. Томск 634050, Россия

<sup>4</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,  
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь

Поступила в редакцию 22.07.2021.

После доработки 21.02.2022.

Принята к публикации 21.02.2022.

Рассмотрена полимер-полимерная пара трения из композитов на основе антифрикционного сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и высокопрочного полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) для различных условий функционирования (смазочная среда и сухое трение при дефиците синовиальной жидкости в суставе). По данным систематических механических и трибоиспытаний поэтапно обоснован выбор наполнителей для СВМПЭ и ПЭЭК. Решена задача определения оптимального состава композитов, предполагающих возможность изготовления кастомизированных эндопротезов суставов с применением аддитивных производственных технологий. Показано, что трибопара «ПЭЭК (палец) — СВМПЭ (диск)» является хорошо совместимой, характеризуется низким коэффициентом трения ( $f = 0,02$ ) и отсутствием регистрируемого оптическим методом износа контактирующих тел. Исследовано трение ненаполненного СВМПЭ по ПЭЭК, армированного двумя типами углеродных волокон (молотые углеродные волокна — 30 вес. % и УНТ — 2,5 вес. %). Показано, что углеродные нанотрубки являются эффективным наполнителем для ПЭЭК в паре «СВМПЭ—ПЭЭК» при сухом трении скольжения в условиях недостатка синовиальной жидкости.

**Ключевые слова:** эндопротез, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэфирэфиркетон, износостойкость, коэффициент трения, модуль упругости, граничная смазка, теплопроводность, трибоиспытания.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

**Адрес для переписки:**

С.В. Панин  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия;  
Томский политехнический университет,  
просп. Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия  
e-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Address for correspondence:**

S.V. Panin  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia;  
Tomsk Polytechnic University,  
pr. Lenina, 30, Tomsk 634050, Russia  
e-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Для цитирования:**

С.В. Панин, В.О. Алексенко, Д.Г. Буслович, Л.А. Корниенко,  
А.В. Бяков, Б.А. Люкшин, С.В. Шилько.

Оптимальный выбор материалов для полимер-полимерных  
эндопротезов по трибологическим критериям.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 1. — С. 15–30.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

**For citation:**

S.V. Panin, V.O. Alexenko, D.G. Buslovich, L.A. Kornienko,  
A.V. Byakov, B.A. Lyukshin, and S.V. Shil'ko

[Optimal Material Selection for Polymer Implants According to  
Tribological Criteria]

*Trenie i Iznos.*

2022, vol. 43, no. 1, pp. 15–30 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

# Optimal Material Selection for Polymer Implants According to Tribological Criteria

S.V. Panin<sup>1,2</sup>, V.O. Alexenko<sup>1</sup>, D.G. Buslovich<sup>1</sup>, L.A. Kornienko<sup>1</sup>, A.V. Byakov<sup>1</sup>,  
B.A. Lyukshin<sup>1,3</sup>, and S.V. Shil'ko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia*

<sup>2</sup>*Tomsk Polytechnic University,  
pr. Lenina, 30, Tomsk 634050, Russia*

<sup>3</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
pr. Lenina, 40, Tomsk 634050, Russia*

<sup>4</sup>*V.A. Bely Metal-Polymer Research Institute of NAS Belarus,  
Kirov St., 32a, Gomel 246050, Belarus*

Received 21.07.2021.

Revised 21.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

## Abstract

In order to develop a bionically adequate endoprosthesis (implant), a polymer-polymer tribological pair made of composites based on antifriction ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and high-strength polyetheretherketone (PEEK) was proposed and tested at various operating conditions (water lubrication and dry sliding friction simulating a deficit of synovial fluid in the joint). Based on the data of systematic mechanical and tribological tests, the selection of fillers for UHMWPE and PEEK was substantiated step by step. The problem of finding out the optimal content of the composites, suggesting the possibility of manufacturing customized joint endoprostheses using additive manufacturing technologies, has been solved. It was shown that the tribological mating “PEEK (pin) — UHMWPE (disk)” was well compatible, characterized by a low coefficient of friction ( $f = 0.02$ ), while no wear was found by means of optical microscopy observations. The friction of neat UHMWPE on PEEK reinforced with two types of carbon fibers (milled carbon fibers — 30 wt.% and CNT — 2.5 wt.%) was studied. It has been shown that carbon nanotubes are efficient filler for PEEK in the UHMWPE–PEEK tribological mating at dry sliding friction under conditions of synovial fluid deficiency.

**Keywords:** endoprosthesis, ultra-high molecular weight polyethylene, polyetheretherketone, wear factor, coefficient of friction, elastic modulus, boundary lubrication, thermal conductivity, tribological testing.

DOI:10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

---

### Адрес для переписки:

С.В. Панин  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия;  
Томский политехнический университет,  
просп. Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия  
e-mail: svp@ispms.tsc.ru

### Address for correspondence:

S.V. Panin  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia;  
Tomsk Polytechnic University,  
pr. Lenina, 30, Tomsk 634050, Russia  
e-mail: svp@ispms.tsc.ru

### Для цитирования:

С.В. Панин, В.О. Алексенко, Д.Г. Буслович, Л.А. Корниенко,  
А.В. Бяков, Б.А. Люкшин, С.В. Шилько.

Оптимальный выбор материалов для полимер-полимерных  
эндопротезов по трибологическим критериям.

Трение и износ.

2022. – Т. 43, № 1. – С. 15–30.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

### For citation:

S.V. Panin, V.O. Alexenko, D.G. Buslovich, L.A. Kornienko,  
A.V. Byakov, B.A. Lyukshin, and S.V. Shilko

[Determination of the Properties of Additives to Lubricants Operating  
under Conditions of Boundary Friction].

*Trenie i Iznos.*

2022, vol. 43, no. 1, pp. 15–30 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-15-30

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Tudor A., Laurian T., and Popescu V.M.** The Effect of Clearance and Wear on the Contact Pressure of Metal on Polyethylene Hip Prostheses // *Tribology International*. — 2013 (**63**), 158—168. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.11.002>.
2. **Kurtz S.** High Pressure Crystallized UHMWPEs // in *UHMWPE Biomaterials Handbook: 3-rd Edition*, edited by Steven M. Kurtz. — Norwich, NY: William Andrew Publishing. — 2016, 434—448.
3. **Friedrich K.** Polymer Composites for Tribological Applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. — 2018 (**1**), 3—39. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>.
4. **Merola M. and Affatato S.** Materials for Hip Prostheses: A Review of Wear and Loading Considerations // *Materials*. — 2019 (**12**), 495. <https://doi.org/10.3390/ma12030495>.
5. **Buford A. and Goswami T.** Review of Wear Mechanisms in Hip Implants: Paper I – General // *Materials and Design*. — 2004 (**25**), 385—393. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.010>.
6. **Ramakrishna S., et al.** Biomedical Applications of Polymer-Composite Materials: A Review // *Composites Science and Technology*. — 2001 (**61**), 1189—1224.
7. **Hall R. M. and Unsworth A.** Friction in Hip Prostheses // *Biomaterials*. — 1997 (**18**), no. 15, 1017—1026.
8. **Brandt J. and Hein W.** Polymer Materials in Joint Surgery / Grellmann W., Seidler S. (eds) // in *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*. Engineering Materials. — Springer, Berlin, Heidelberg. — 2001. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04556-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04556-5_30).
9. **Spiegelberg S., Kozak A., and Braithwaite G.** Characterization of Physical, Chemical, and Mechanical Properties of UHMWPE / ed. Steven M. Kurtz // in *UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition)*. — William Andrew Publishing. — 2016, 531—552, ISBN 9780323354011, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35401-1.00029-6>.
10. **Fang L., Leng Y., and Gao P.** Processing and Mechanical Properties of HA/UHMWPE Nanocomposites // *Biomaterials*. — 2006 (**27**), 3701—3707.
11. **Шилько С.В., Старжинский В.Е., Петроковец Е.М., Черноус Д.А.** Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов. Часть 1 // *Трение и износ*. — 2013 (**34**), № 1, 82—86.
12. **Essner A., Sutton K., and Wang A.** Hip Simulator Wear Comparison of Metal-on-Metal, Ceramic-on-Ceramic and Crosslinked UHMWPE Bearings // *Wear*. — 2005 (**259**), 992—995. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.104>.
13. **Scholes S.C., Unsworth A.** Wear Studies on the Likely Performance of CFR-PEEK/CoCrMo for Use as Artificial Joint Bearing Materials // *J. of Materials Science: Materials in Medicine*. — 2009 (**20**), 163—170. <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3558-3>.
14. **Cowiea R.M., Briscoe A., Fishera J., and Jennings L.M.** Wear and Friction of UHMWPE-on-PEEK OPTIMA // *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. — 2019 (**89**), 65—71. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.09.021>.
15. **Wang A., Lin R., Stark C., and Dumbleton J.** Suitability and Limitations of Carbon Fiber Reinforced PEEK Composites as Bearing Surfaces for Total Joint Replacements // *Wear*. — 1999 (**225**), 724—727.
16. **Brockett C.L., Carbone S., Fisher J., and Jennings L.M.** PEEK and CFR-PEEK as Alternative Bearing Materials to UHMWPE in a Fixed Bearing Total Knee Replacement: An Experimental Wear Study // *Wear*. — 2017 (**374-375**), 86—91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.Wear.2016.12.010>.
17. **East R.H., Briscoe A., and Unsworth A.** Wear of PEEK-OPTIMA and PEEK OPTIMA-Wear Performance Articulating Against Highly Cross-Linked Polyethylene // *Proc IMechE Part H: J. Engineering in Medicine*. — 2015 (**229**), 187—193. <https://doi.org/10.1177/0954411915576353>.
18. **Pinchuk L.S., Nikolaev V.L., Tsvetkova E.A., and Goldade V.A.** *Tribology and Biophysics of Artificial Joints*. — Elsevier science Publishing Company. — 2006.
19. **Panin S.V., Buslovich D.G., Dontsov Y.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Bochkareva S.A., and Shilko S.V.** Two-Component Feedstock Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene for Additive Manufacturing of Medical Products // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. — 2021 (**4**), 235—250. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.05.003>

## References

1. **Tudor A., Laurian T., and Popescu V.M.** The Effect of Clearance and Wear on the Contact Pressure of Metal on Polyethylene Hip Prostheses // *Tribology International*. — 2013 (**63**), 158—168. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.11.002>.
2. **Kurtz S.** High Pressure Crystallized UHMWPEs // in *UHMWPE Biomaterials Handbook: 3-rd Edition*, edited by Steven M. Kurtz. — Norwich, NY: William Andrew Publishing. — 2016, 434—448.
3. **Friedrich K.** Polymer Composites for Tribological Applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. — 2018 (**1**), 3—39. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>.
4. **Merola M. and Affatato S.** Materials for Hip Prostheses: A Review of Wear and Loading Considerations // *Materials*. — 2019 (**12**), 495. <https://doi.org/10.3390/ma12030495>.
5. **Buford A. and Goswami T.** Review of Wear Mechanisms in Hip Implants: Paper I – General // *Materials and Design*. — 2004 (**25**), 385—393. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.010>.

6. **Ramakrishna S., et al.** Biomedical Applications of Polymer-Composite Materials: A Review // *Composites Science and Technology*. — 2001 (61), 1189—1224.
7. **Hall R. M. and Unsworth A.** Friction in Hip Prostheses // *Biomaterials*. — 1997 (18), no. 15, 1017—1026
8. **Brandt J. and Hein W.** Polymer Materials in Joint Surgery / Grellmann W., Seidler S. (eds) // in *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*. Engineering Materials. — Springer, Berlin, Heidelberg. — 2001. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04556-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04556-5_30).
9. **Spiegelberg S., Kozak A., and Braithwaite G.** Characterization of Physical, Chemical, and Mechanical Properties of UHMWPE / ed. Steven M. Kurtz // in *UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition)*. — William Andrew Publishing. — 2016, 531—552, ISBN 9780323354011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35401-1.00029-6>.
10. **Fang L., Leng Y., and Gao P.** Processing and Mechanical Properties of HA/UHMWPE Nanocomposites // *Biomaterials*. — 2006 (27), 3701—3707
11. **Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Petrokovets E.M., and Chernous D.A.** Two-Level Calculation Method for Tribojoints Made of Disperse-Reinforced Composites: Part 1. // *Journal of Friction and Wear*. — 2013 (34), 65—69. <https://doi.org/10.3103/S1068366613010133>.
12. **Essner A., Sutton K., and Wang A.** Hip Simulator Wear Comparison of Metal-on-Metal, Ceramic-on-Ceramic and Crosslinked UHMWPE Bearings // *Wear*. — 2005 (259), 992—995. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.104>.
13. **Scholes S.C., Unsworth A.** Wear Studies on the Likely Performance of CFR-PEEK/CoCrMo for Use as Artificial Joint Bearing Materials // *J. of Materials Science: Materials in Medicine*. — 2009 (20), 163—170. <https://doi.org/10.1007/s10856-008-3558-3>.
14. **Cowiea R.M., Briscoe A., Fishera J., and Jenningsa L.M.** Wear and Friction of UHMWPE-on-PEEK OPTIMA // *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. — 2019 (89), 65—71. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.09.021>.
15. **Wang A., Lin R., Stark C., and Dumbleton J.** Suitability and Limitations of Carbon Fiber Reinforced PEEK Composites as Bearing Surfaces for Total Joint Replacements // *Wear*. — 1999 (225), 724—727
16. **Brockett C.L., Carbone S., Fisher J., and Jennings L.M.** PEEK and CFR-PEEK as Alternative Bearing Materials to UHMWPE in a Fixed Bearing Total Knee Replacement: An Experimental Wear Study // *Wear*. — 2017 (374-375), 86—91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.Wear.2016.12.010>.
17. **East R.H., Briscoe A., and Unsworth A.** Wear of PEEK-OPTIMA and PEEK OPTIMA-Wear Performance Articulating Against Highly Cross-Linked Polyethylene // *Proc IMechE Part H: J. Engineering in Medicine*. — 2015 (229), 187—193. <https://doi.org/10.1177/0954411915576353>.
18. **Pinchuk L.S., Nikolaev V.L., Tsvetkova E.A., and Goldade V.A.** Tribology and Biophysics of Artificial Joints. — Elsevier science Publishing Company. — 2006
19. **Panin S.V., Buslovich D.G., Dontsov Y.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Bochkareva S.A., and Shilko S.V.** Two-Component Feedstock Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene for Additive Manufacturing of Medical Products // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. — 2021 (4), 235—250. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.05.003>

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)