

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОПАРЫ МЕТАЛЛ — НЕМЕТАЛЛ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

С. Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА, П. П. КОВАЛЕНКО, Т. Б. КОРАХАНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: kovalenko\_p.p@mail.ru*

Рассматриваются процессы, происходящие на поверхностях материалов при взаимодействии металлических и неметаллических частей протезов, ортезов и экзоскелетов. Для исследования выбраны пары трения дюралюминий Д16—фторопласт и сталь ХВГ—фторопласт без смазочного материала. Экспериментальные исследования проводились с использованием универсальной фрикционной машины МТУ-1. В результате экспериментов получены зависимости коэффициентов трения и температуры в области контакта от времени взаимодействия. Выполнена оценка износа контактирующих образцов. Анализ результатов позволил выбрать подходящие материалы для производства ортезов, протезов и экзоскелетов.

**Ключевые слова:** *дюралюминий—фторопласт, трибологические характеристики, коэффициент трения, износ, температура в точке контакта, проектирование ортезов, протезов, экзоскелетов*

**Введение.** В последнее время разработан широкий спектр различных мехатронных устройств — ортезов и экзоскелетов для реабилитации после травм или заболеваний, вызывающих дисфункции конечностей. Эти устройства могут быть использованы для восстановления утраченных функций нижних или верхних конечностей [1—4]. В случае потерянной конечности протез можно использовать для улучшения качества жизни [5]. Экзоскелеты могут также использоваться для снижения физической нагрузки или увеличения мышечной силы рабочих на производстве [6]. Большинство этих устройств спроектированы для ношения на человеке, это означает, что их вес играет значительную роль и должен учитываться при проектировании. Другим важным вопросом, связанным с дизайном экзоскелетов и ортезов, является выбор источника питания. Для увеличения времени автономной работы системы могут использоваться батареи большой емкости. Однако это увеличит вес устройства, а также может увеличить трение в соединениях устройства и, следовательно, износ деталей. Требования к прочностным характеристикам, весу, размеру и надежности ортезов, экзоскелетов и протезов приводят к необходимости тщательного выбора материалов для изготовления их деталей. Следует учитывать не только прочностные свойства материалов, но и трибологические свойства пар трения [7].

**Материалы для проектирования ортезов, протезов и экзоскелетов.** При проектировании и изготовлении мехатронных систем для роботизированной реабилитации используются нержавеющая сталь, сплавы, полимеры, резина и волокно [8]. Некоторые из этих материалов обладают повышенной твердостью, другие — эластичностью; их трибологические свойства влияют на износ и энергоэффективность системы.

В качестве материалов для настоящего исследования были выбраны дюралюминий Д16, сталь ХВГ и фторопласт. Использование этих материалов в протезах, ортезах и экзоскелетах способствует уменьшению их веса, сокращению коэффициента трения в трибопарах и износа взаимодействующих частей.

Дюралюминий Д16 широко используется для изготовления пар трения в протезах, ортезах и экзоскелетах. Его малый удельный вес обеспечивает малый вес конструкции и снижает нагрузку на пары трения, кроме того, дюралюминий обладает коррозионной стойкостью, что уменьшает износ трибопары. Поверхность деталей из дюралюминия легко поддается нанесению покрытий, которые не требуют дополнительной смазки и устойчивы к загрязнению [9].

Фторопласт используется в различных мехатронных устройствах из-за низкого коэффициента трения, он устойчив к химическому воздействию, радиации и коррозии. Фторопласты также огнеупорны и обладают свойством самозатухания при воспламенении. Они химически инертны к агрессивной среде, что позволяет использовать различные виды смазочных материалов в парах трения.

Нержавеющая сталь ХВГ может использоваться для деталей ортезов и экзоскелетов, которые требуют высокой твердости и износостойкости.

Для сравнения процессов трения в трибопарах фторопласт—сталь ХВГ и фторопласт—дюралюминий Д16 были проведены две серии экспериментов. В результате были определены момент трения, температура в области контакта [10] и коэффициент трения для каждой из трибопар.

**Универсальная машина трения МТУ-1.** Известно большое количество различных измерительных машин и методов для оценки трибологических свойств [11—13]. В настоящей работе для экспериментального исследования трибологических свойств дюралюминия, стали ХВГ и фторопласта использовалась универсальная машина трения МТУ-1.

На рис. 1 показаны следующие части универсальной машины трения МТУ-1: 1 — таблица скорости вращения; 2 — кнопка питания; 3 — регулятор скорости вращения; 4 — система измерения момента трения с упругим чувствительным элементом; 5 — тензодатчик для измерения осевой нагрузки; 6 — привод быстрой подачи; 7 — привод точной подачи; 8 — патрон для верхнего образца; 9 — резервуар для смазки; 10 — ручка для перемещения координатного стола.

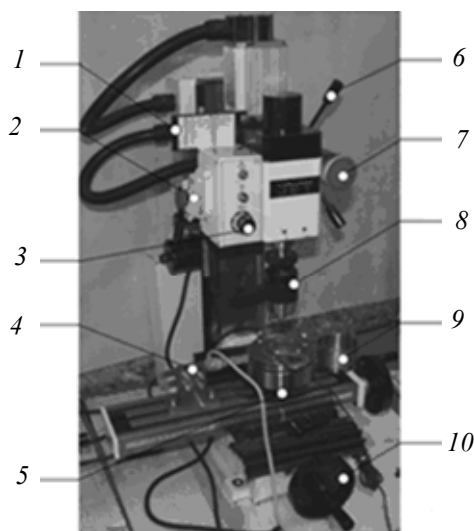


Рис. 1

МТУ-1 основана на вертикальном фрезерном станке JMD-X1 и содержит оригинальный сборный узел трения, который позволяет сохранить параллельность контактных поверхностей. Габаритные размеры машины допускают ее размещение на лабораторном столе. Машина устойчива к вибрации, электромагнитным помехам, пыли, влажности и колебаниям температуры.

Метод тестирования для МТУ-1 основан на вращательном движении верхнего образца относительно неподвижного нижнего образца со смазочными материалами или без них с использованием различных схем испытаний, таких как „диск по диску“, „сфера по кольцу“,

„плоскость по плоскости“ и т. д. Скорость вращения верхнего образца без нагрузки варьирует от 0 до 2500 об/мин, сила нажатия на образцы — от 50 до 1000 Н [14].

**Экспериментальные результаты.** Первая серия экспериментов была проведена для трибопары фторопласт—сталь ХВГ со следующими условиями: скорость вращения 300 об/мин, начальная нагрузка 120 Н (силы и нагрузки, действующие в ортезах, были оценены Сильвой и др. в [15]).

Для трибопары фторопласт—сталь ХВГ на рис. 2, а приведена зависимость температуры в области контакта от времени эксперимента. Видно, что примерно на 100-й секунде от начала эксперимента есть точка перегиба. Вероятно, это связано с появлением зоны частичного оплавления поверхности фторопласта, что указывает на возникновение температурной вспышки в зоне контакта. На рис. 2, б показана зависимость температуры в области контакта и коэффициента трения от времени эксперимента.

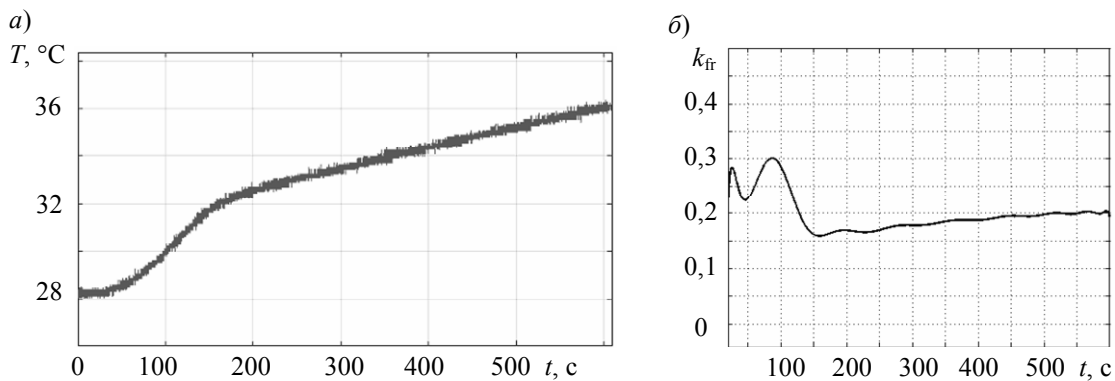


Рис. 2

Из графика видно, что максимальный коэффициент трения равен 0,3. Это связано с началом приработки в трибопаре. После завершения процесса приработки коэффициент трения резко уменьшается.

На рис. 3 показаны фотографии поверхности фторопласта после проведения эксперимента (увеличение  $88\times$ ). Видны как области оплавления фторопласта, так и области избирательного переноса при трении. Следует отметить, что поверхность образца из стали практически не изменилась, что обусловлено высокой твердостью и износостойкостью стали.

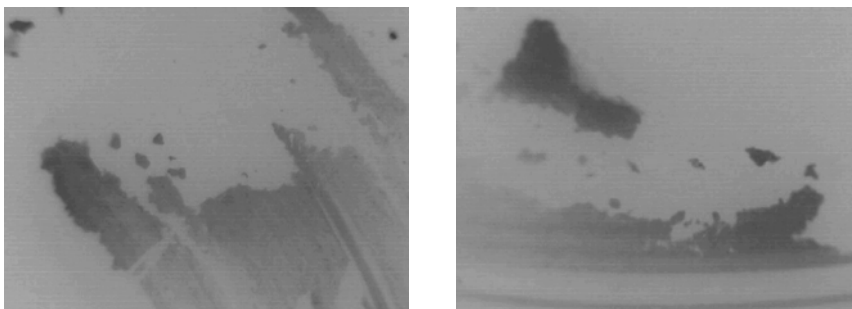


Рис. 3

Вторая серия экспериментов была посвящена изучению трибологических свойств дюралюминий Д16—фторопласт. Условия эксперимента: скорость вращения 300 об/мин, начальная нагрузка 150 Н.

Для трибопары дюралюминий—фторопласт на рис. 4 представлены графики зависимости температуры в зоне контакта и коэффициента трения от времени.

На рис. 4, а можно видеть, что температура в области контакта постепенно увеличивается во время эксперимента. Это можно объяснить отсутствием значительного износа на поверхности образцов. Максимальное значение коэффициента трения в трибопаре 0,38.

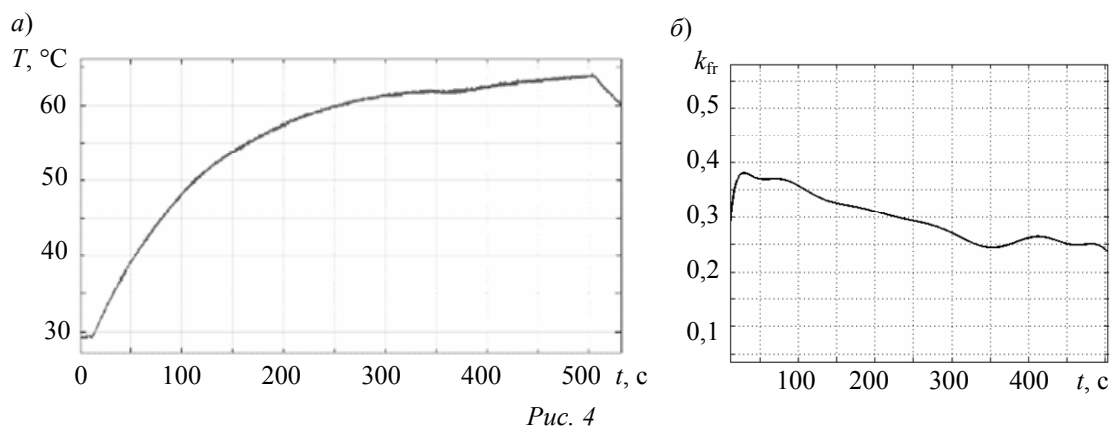


Рис. 4

На рис. 5 представлена фотография поверхности фторопласта после эксперимента (увеличение  $87\times$ ). Видны участки приработки после трения, но их количество и размер незначительны.



Рис. 5

**Заключение.** Анализ результатов экспериментов показал, что трибопара дюралюминий Д16—фторопласт имеет более низкий коэффициент трения, чем трибопара фторопласт—сталь ХВГ. Причем сам процесс трения в первой трибопаре является более стабильным и не вызывает резких изменений коэффициента трения, что связано как со строением молекулы фторопласта, которое обуславливает химическую инертность материала, так и со структурой поверхности дюралюминия, наличием на ней окислов, предотвращающих возникновение молекулярных мостиков в трибопаре.

Коэффициент трения в трибопаре дюралюминий—фторопласт уменьшается после приработки, процессы разрушения поверхностного слоя не затрагивают всю площадь контакта, а проявляются только в точках реального контакта поверхностей трибопары, что позволяет с высокой точностью предсказать поведение трибоконтакта во времени. Результаты исследования позволяют сделать вывод том, что применение трибопары дюралюминий—фторопласт, особенно при наличии покрытия на деталях из дюралюминия или граничной смазки, является удобным для использования пар трения протезов, ортезов и экзоскелетов в отсутствие соприкосновения с внутренними тканями организма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prange G. B., Jannink M. J., Groothuis-Oudshoorn C. G., Hermens H. J., Ijzerman M. J. Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke // J. of Rehabilitation Research and Development. 2006. Vol. 43, N 2. P. 171—184.
2. Agrawal A., Banala S. K., Agrawal S. K., Binder-Macleod S. A. Design of a two degree-of-freedom ankle-foot orthosis for robotic rehabilitation // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Rehabilitation Robotics. 2005. P. 41—44.
3. Dollar A., Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art // IEEE Transact. on Robotics. 2008. Vol. 24, N 1. P. 144—158.

4. Kim S., Son Y., Choi S., Ham S., Park C. Design of a simple, lightweight, passive-elastic ankle exoskeleton supporting ankle joint stiffness // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86, N 9. Art. no. 095107.
5. Resnik L., Meucci M. R., Lieberman-Klinger S., Fantini C., Kelty D. L., Disla R., Sasson N. Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2012. Vol. 93. P. 710—717.
6. De Looze M. P., Bosch T., Krause F., Stadler K. S., O'Sullivan L. W. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load // Ergonomics. 2015. Vol. 59, N 5. P. 671—681.
7. Levanov I. G., Zadorozhnaya E. A., Dudnikov A. L. Methods of assessing the resource of the crankshaft bearing of internal combustion engine based on the calculation of hydro-mechanical characteristics // Tribology in Industry. 2015. Vol. 37, N 3. P. 360—365.
8. Sanders J. E., Greve J. M., Mitchell S. B., Zachariah S. G. Material properties of commonly-used interface materials and their static coefficients of friction with skin and socks // J. of Rehabilitation Research and Development. 1998. Vol. 35, N 2. P. 161—176.
9. Goryacheva I. G., Torskaya E. V., Kornev Y. V., Kovaleva I. N., Myshkin N. K. Theoretical and experimental study of the mechanical properties of bicomponent metal vapor deposited coatings // J. of Friction and Wear. 2015. Vol. 36, N 3. P. 262—265.
10. Rozhdestvensky Y., Zadorozhnaya E. A simulation of the thermal state of heavily loaded tribo-units and its evaluation // Bull. of the South Ural State University, Ser. Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2014. Vol. 7, N 4. P. 51—64.
11. Sel'kin V. P., Kopylov S. V. Friction machine for testing materials under boundary lubrication // J. of Friction and Wear. 2016. Vol. 37, N 2. P. 184—186.
12. Grigoriev A. Y., Gutsev D. M., Zozulya A. P., Kovaliova I. N., Kudritskii V. G., Myshkin N. K., Semenyuk M. S. Reciprocating MTU-2K7 millitribometer // J. of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, N 6. P. 455—459.
13. Pechenin V. A., Bolotov M. A., Ruzanov N. V., Yanyukina M. V. Optimization of measurements of the geometry of parts with complex surfaces // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58, Is. 3. P. 261—268.
14. Perpelkina S., Kovalenko P., Pechenko R. Investigation of Tribological Properties of Metallic Materials with the Use of the Universal Friction Machine "MTU-1" // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 301—309.
15. Silva P. C., Silva M. T., Martins J. M. Evaluation of the contact forces developed in the lower limb/orthosis interface for comfort design // Multibody System Dynamics. 2010. Vol. 24, N 3. P. 367—388.

**Сведения об авторах**

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Павел Павлович Коваленко</b>     | — канд. техн. наук; доцент, Университет ИТМО, кафедра мехатроники;<br>E-mail: kovalenko_p.p@mail.ru |
| <b>Светлана Юрьевна Перепелкина</b> | — канд. техн. наук; доцент, Университет ИТМО, кафедра мехатроники;<br>E-mail: sker@mail.ifmo.ru     |
| <b>Тимур Ботирович Кораханов</b>    | — студент; Университет ИТМО, кафедра мехатроники;<br>E-mail: korahanoff@mail.ru                     |

Поступила в редакцию  
21.11.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Перепелкина С. Ю., Коваленко П. П., Кораханов Т. Б. Исследование трибологических характеристик трибопары металл — неметалл для проектирования биомехатронных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 112—117.

**INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF METAL — NON-METAL FRICTION PAIRS FOR DESIGNING BIOMECHATRONIC SYSTEMS****S. Yu. Perepelkina, P. P. Kovalenko, T. B. Korakhanov***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: kovalenko\_p.p@mail.ru*

Processes occurring on the surfaces of materials during interaction between metal and non-metal parts of orthoses, prostheses and exoskeletons are considered. These biomechatronic devices are noted to require careful selection of materials for their design and manufacturing with the account for both mechanical properties of the materials and their tribological characteristics. Samples of duralumin — fluoropolymer and stainless steel 100CrMn6 — fluoropolymer friction pairs are chosen for the research; the plane-on-plane contact scheme without any lubricants is applied. Results of experiments carried out with the use of the universal friction machine MTU-1 are described. Dependencies of friction torque, friction coefficient, and the temperature in the contact area on the runtime are obtained on the base of the experimental data. Estimation of the wear of contacting samples is presented. Analysis of the results are reported to justify the choice of suitable materials for design of orthoses, prostheses and exoskeletons.

**Keywords:** duralumin — fluoropolymer, tribological characteristics, friction coefficient, wear, temperature in the contact area, designing orthoses, prostheses and exoskeletons

**Data on authors**

- Svetlana Yu. Perepelkina** — PhD, Associate Professor, Department of Mechatronics, ITMO University; E-mail: sker@mail.ifmo.ru
- Pavel P. Kovalenko** — PhD, Associate Professor, Department of Mechatronics, ITMO University; E-mail: sker@mail.ifmo.ru
- Timur B. Korakhanov** — Student, Department of Mechatronics, ITMO University; E-mail: korahanoff@mail.ru

**For citation:** Perepelkina S. Yu., Kovalenko P. P., Korakhanov T. B. Investigation of tribological properties of metal — non-metal friction pairs for designing biomechatronic systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 112—117 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-112-117