

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-54-80-82>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ПАРЕ ТРЕНИЯ С ЛАТУННЫМ КОНТРОБРАЗЦОМ

**Бирюков В.П., Якубовский А.А.**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** полиэфирэфиркетон, полиэфиримид, полифенилсульфид, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, возвратно-поступательное трение.

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются результаты по определению коэффициентов трения и интенсивности изнашивания образцов полимеров полифенилсульфида, полиэфиримида, полиэфиркетона и сверхвысокомолекулярного полиэтилена на возвратно-поступательной машине трения без использования смазки. Определено, что образцы сверхвысокомолекулярного полиэтилена имели наименьшую интенсивность изнашивания  $0,4 \cdot 10^{-3}$  и наименьший коэффициент трения 0,038, а у образцов полифенилсульфида интенсивность изнашивания и коэффициент трения были в 12 и 2 раза выше соответственно.

## DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENTS AND WEAR INTENSITY OF POLYMERS IN A FRICTION PAIR WITH A BRASS COUNTER-SAMPLE

**Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.**

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

**Keywords:** polyetheretherketone, polyetherimide, polyphenylsulfide, ultra-high molecular weight polyethylene, coefficient of friction, wear rate, reciprocating friction.

**Abstract.** This paper examines the results of determining the coefficients of friction and the intensity of wear of polymer samples of poly phenyl sulfide, polyetherimide, polyether ketone and ultrahigh molecular weight polyethylene on a reciprocating friction machine without the use of lubricants. It was determined that the samples of ultrahigh molecular weight polyethylene had the lowest wear rate of  $0.4 \cdot 10^{-3}$  and the lowest coefficient of friction of 0.038, while the samples of poly phenyl sulfide had a wear rate and coefficient of friction 12 and 2 times higher, respectively.

В современном машиностроении полимеры и полимерные композитные материалы (ПКМ) заняли прочные позиции и продолжают расширять сферу влияния. Их востребованность обусловлена комплексным решением ряда задач: от снижения веса конструкций до упрощения технологических процессов и сокращения затрат.

Были изготовлены [1] образцы из политетрафторэтилена (ПТФЭ) использовавшегося в двух видах, порошковом (ПТФЭп) и разделенным на волокна (ПТФЭв) (длина: 6 мм), смешанные с 5% полифенилсульфидом и рубленым углеродным волокном (длина 8 мм, диаметр 7 мкм) в соотношении 7/3, также были изготовлены образцы фибриллированного сополимера тетрафторэтилена-перфторалкилвинилового эфира (ПФА). Трибологические

испытания проводили на машине трения по схеме «кольцо-кольцо», при нагрузке 100, 200, 300 Н, и частоте вращения 100, 200 мин<sup>-1</sup>. Композиты ПФА показали самый низкий коэффициент трения 0,10 и скорость износа  $1,72 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/с при нагрузке 300 Н и частоте вращения 200 мин<sup>-1</sup>. У композитов ПТФЭ наблюдали самый низкий коэффициент трения 0,14 и скорость износа  $1,62 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/с при 200 Н и 200 мин<sup>-1</sup>.

Образцы полиэфиркетона [2] (ПЭЭК) были смешаны с коротким углеродным волокном (КУВ) массовой доли 5, 10, 15, 20%. Трибологические испытания проводили на машине трения по схеме «Штифт (диаметр 5 мм, сталь GCr15) – диск (полимер, композит)» при нагрузке 100 Н, частоте вращения 100 мин<sup>-1</sup>, и времени цикла 2 часа. Композит, содержащий 10% КУВ, демонстрировал наименьшие коэффициент трения 0,05 и скорость износа  $8,1 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/(Н·м).

В данном исследовании в качестве образцов [3] с размерами 20 × 10 × 4 мм использовались чистый ПТФЭ, ПТФЭ смешанный со слоистым двойным гидроксидом (ПТФЭ/СДГ), ПТФЭ смешанный с наностержнями аттапульгита (ПТФЭ/НСА) и ПТФЭ смешанный с СДГ и НСА (ПТФЭ/СДГ/НСА) в массовых долях 4, 8, 12, 16%. Трибологические испытания проводили по схеме «кольцо (диаметр 40 мм, сталь 45) – плоскость (полимер, композиты)» при скорости скольжения 0,42 м/с, нагрузке 196 Н, времени цикла 2 ч. Коэффициент трения для чистого ПТФЭ составил 0,183, а для композитов ПТФЭ/СДГ, ПТФЭ/НСА и ПТФЭ/СДГ/НСА при добавлении 4% наполнителя он был ниже, чем у чистого ПТФЭ, самый низкий коэффициент трения был у композита ПТФЭ/СДГ 0,167. При 8% коэффициенты трения составили 0,179, 0,186 и 0,183 соответственно. По мере увеличения содержания наполнителей до 16% коэффициенты трения продолжали расти до значений 0,201, 0,224 и 0,203. Интенсивность изнашивания ПТФЭ составляла  $16,517 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/(Н·м). У композитов ПТФЭ/СДГ, ПТФЭ/НСА и ПТФЭ/СДГ/НСА удельная интенсивность изнашивания снизилась до 0,307, 0,246 и  $0,142 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/(Н·м) соответственно.

Цель работы определение коэффициентов трения и интенсивности изнашивания образцов полимеров полифенилсульфида (ZX530), полиэфиримида (ZX410), полиэфиркетона (ZX324) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (PE9000) на возвратно-поступательной машине трения без смазки при использовании латунного контробразца.

Образцы полимеров полифенилсульфида (ZX530), полиэфиримида (ZX410), полиэфиркетона (ZX324) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (PE9000) были вырезаны из листовых заготовок размером 1000×70×10 мм. Испытания по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания были проведены на машине трения возвратно-поступательного движения МТВ-М при частоте 200 мин<sup>-1</sup> и нагрузке 2000 Н, в течении 20 минут без смазки. Перед испытанием образцы полимеров и контробразец были шлифованы на шлифовальном станке с использованием бумаги зернистость Р600. Контробразец был выполнен из латуни ЛМц58-2 с размерами 12×20×80 мм с нанесенными перпендикулярно длинной его стороне канавками

шириной 1 мм и с шагом 5 мм. Твердость контробразца составляла 55-65 HV<sub>0,1</sub>. Твердость полимеров составляла ZX530 – 23,52 HV<sub>0,01</sub>, ZX410 – 27,82 HV<sub>0,01</sub>, ZX324 – 35,31 HV<sub>0,01</sub>, ZX530 – 5,3 HV<sub>0,01</sub>. Результаты испытаний по определению коэффициентов трения и интенсивности изнашивания образцов полимеров и латуни представлены в таблице 1.

Табл. 1. Интенсивность изнашивания и коэффициенты трения

| Образец | Интенсивность изнашивания образца | Интенсивность изнашивания контробразца | Коэффициент трения |
|---------|-----------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
|         | $I_1 \cdot 10^{-3}$               | $I_2 \cdot 10^{-3}$                    | $f$                |
| ZX 530  | 4,8                               | 0,3                                    | 0,075              |
| ZX 410  | 3,3                               | 0,2                                    | 0,096              |
| ZX 324  | 3,1                               | 0,1                                    | 0,091              |
| PE 9000 | 0,4                               | 0,1                                    | 0,038              |

По результатам приведенных в таблице данных видно, что наибольший коэффициент трения был у полиэфиримида 0,096, а наименьший у сверхвысокомолекулярного полиэтилена 0,038, за ними следовали полифенилсульфид и полиэфиркетон 0,075, 0,091 соответственно. Наибольшая интенсивность изнашивания была у образцов полифенилсульфида  $4,8 \cdot 10^{-3}$ , у других полимерных образцов она была в 1,45-12 раз ниже.

### Выводы

Определено, что образцы сверхвысокомолекулярного полиэтилена имели наименьшую интенсивность изнашивания  $0,4 \cdot 10^{-3}$  и наименьший коэффициент трения 0,038, а у образцов полифенилсульфида интенсивность изнашивания и коэффициент трения были в 12 и 2 раза выше соответственно.

+

### Список литературы / References

1. Qiu X., Luo B., Gu A., Tang W., Xie M., Tang S., Yu Z. Tribological properties of perfluoropolymer fiber filled carbon fiber/polyphenylene sulfide composites: Effect of in-situ fibrillated fiber or split fiber // Polymer Composites. 2025, vol. 46, iss. 1, pp. 679-691. DOI: 10.1002/pc.29016.
2. Chao B., Chen Z., Li Z., He P., Hu Y. Effect of SCF Content on Mechanical and Tribological Properties of PEEK Composites // Polymer Composites. 2026, vol. 47, iss. 51, pp. S706-S716. DOI: 10.1002/pc.70832.
3. Xie J., Hao Z., Yin H., Luo Z., Zhao Q., Wu H., He R., Yang L. Tribological Properties of PTFE Composites Reinforced With Attapulgit-Loaded Layered Double Hydroxides // Polymer Composites. 2026, vol. 47, iss. 14, pp. 12741-12754. DOI: 10.1002/pc.71121.

|                                                                                         |                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Бирюков Владимир Павлович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник | <b>Biryukov Vladimir Pavlovich</b> – candidate of technical sciences, leading researcher |
| <b>Якубовский Антон Алексеевич</b> – младший научный сотрудник<br>laser-52@yandex.ru    | <b>Yakubovsky Anton Alekseevich</b> – junior researcher                                  |

Received 25.06.2026