

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-51-96-100>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ЗАЕДАНИЯ ОТ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И ВИДА ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ТРЕНИИ ПО СТАЛИ

Бирюков В.П., Якубовский А.А.

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

Ключевые слова: поллиэфирэфиркетон, полиэфиримид, полифенилсульфид, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, скорость скольжения, критическая нагрузка заедания, морфология поверхности трения, вид изнашивания.

Аннотация. Работа посвящена определению морфологии поверхности трения и критических давлений заедания образцов полиэфирэфиркетона, полиэфиримида, полифенилсульфида и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Испытания были выполнены по схеме: «широкая сторона плоского образца полимера – кольцевая поверхность стальной втулки» при смазке водой. Установлено, что наибольшая стойкость к заеданию была у образцов полиэфиримида, за ним по уменьшению стойкости к заеданию следовали полиэфирэфиркетон, сверхвысокомолекулярный полиэтилен и полифенилсульфид. Основным видом износа образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена было усталостное изнашивание, а для остальных образцов микрорезание.

DETERMINATION OF CRITICAL JAMMING PRESSURES FROM SLIDING SPEED AND TYPE OF POLYMER WEAR DURING FRICTION ON STEEL

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.

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

Keywords: polyester ester ketone, polyetherimide, poly phenyl sulfide, ultrahigh molecular weight polyethylene, sliding speed, critical jamming load, morphology of the friction surface, type of wear.

Abstract. The work is devoted to determining the morphology of the friction surface and the critical jamming pressures of polyester ester ketone, polyetherimide, poly phenyl sulfide, and ultrahigh molecular weight polyethylene samples. The tests were performed according to the scheme: "the wide side of a flat polymer sample is the annular surface of a steel sleeve" when lubricated with water. It was found that polyetherimide samples had the greatest resistance to jamming, followed by polyether ester ketone, ultrahigh molecular weight polyethylene, and poly phenyl sulfide in terms of reduced jamming resistance. The main type of wear on the samples of high molecular weight polyethylene was fatigue wear, and for the remaining samples, micro-cutting.

Для изготовления дисковых образцов [1] диаметром 50 мм были использованы полиэфиримид (ПЭИ) с добавлением 10% политетрафторэтилена (ПТФЭ), а также образцы с добавками 1 и 3% диселенида вольфрама (WSe_2) и WSe_2 с дубильной кислотой (ДК- WSe_2) до 10%. Трибологические испытания проводили на машине трения возвратно-поступательного движения по схеме: «шар (GCr15, диаметром 10 мм) – диск (образцы композитов)» при частоте колебаний шара 5 Гц в течении 20 мин.

Трибологические испытания показали, что при добавлении 10% ПТФЭ к ПЭИ коэффициент трения и объемная скорость износа составляли 0,063 и $2,3 \cdot 10^{-4}$ мкм³/Н·м, что привело к их снижению на 80% и 85% соответственно по сравнению с чистым ПЭИ. При введении 5 мас.% ДК-WSe₂ к композиту (ПЭИ+10% ПТФЭ) были получены минимальные коэффициенты трения и объемная скорость износа 0,015 и $1,3 \cdot 10^{-4}$ мкм³/Н·м соответственно.

Образцы [2] из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) были изготовлены при помощи FDM печати с размерами 8×8×15 мм с различной высотой слоя печати 0,1, 0,2 и 0,3 мм. Твердость ПЭЭК при высоте слоя 0,1 мм была 302 МПа, а при слоях печати 0,2 и 0,3 мм она составляла 289, 268 МПа соответственно. Трибологические испытания были проведены на машине трения по схеме «штифт (образец полимер) – диск (подшипниковая сталь)» при нагрузке 20 Н, скорости скольжения 0,2 м/с, продолжительностью 60 мин на пути трения 600 м. Самый низкий коэффициент трения и скорость износа была у образца ПЭЭК при высоте слоя 0,1 мм – 0,53 и $6,2 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м за ним следовал ПЭЭК с высотой слоя 0,2 мм – 0,55 и $6,6 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м, худший результат был получен при испытании ПЭЭК с высотой слоя 0,3 мм – 0,62 и $8,2 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м. Механические свойства ПЭЭК с толщиной слоя 0,1 мм имели лучший результат однако образец с толщиной слоя 0,2 мм показал близкие результаты и может использоваться во многих областях, поскольку детали изготавливаются быстрее в 2 раза.

Образцы композитов [3] на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с добавлением диоксида nano кремния (SiO₂) и образцы с nano-SiO₂, полученные путем прививки силановых связующих 570 и 550 на поверхностные гидроксильные группы (SiO₂(570)) и (SiO₂(550)) соответственно. Трибологические испытания проводили на машине трения при возвратно-поступательном движении по схеме: «шар (ZCuSn₁₀Zn₂, диаметр 6 мм) – плоскость (образцы полимера, композитов)» при нагрузке 10, 40 Н, частоте двойных ходов 1 Гц, длине хода 8 мм и временем испытания 20 мин. Коэффициенты трения образцов СВМПЭ/SiO₂, СВМПЭ/SiO₂(570), СВМПЭ/SiO₂(550) и СВМПЭ при нагрузках 10 и 40 Н составили 0,19, 0,39, 0,45, 0,55, и 0,12, 0,19, 0,52, 0,67 соответственно. В условиях возвратно поступательного трения скольжения при нагрузках 10 и 40 Н, износ образцов СВМПЭ/SiO₂, СВМПЭ/SiO₂(570) и СВМПЭ/SiO₂(550) составил $1,2 \cdot 10^{-4}$, $1,6 \cdot 10^{-4}$, и $2 \cdot 10^{-4}$ и $7,3 \cdot 10^{-4}$, $6,9 \cdot 10^{-4}$, $6 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м а для образцов СВМПЭ $2,4 \cdot 10^{-4}$ и $9,2 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м соответственно.

При проведении триботехнических и морфологических исследований были задействованы образцы полимеров фирмы Zedek полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) (1) (ZX324), полиэфиримида (ПЭИ) (2)-ZX410, полифенилсульфида (ПФС) (3) – ZX530, сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) (4) (INKULEN PE-9000). На рисунке 1 представлены фотографии образцов перед испытаниями. Для определения морфологии поверхностей трения был использован цифровой микроскоп. Испытания были проведены по схеме: «широкая сторона прямоугольного образца полимера – торец стальной

кольцевой оправки». В качестве смазки была применена вода. Для обеспечения повторяемости результатов поверхности трения всех образцов перед проведением испытаний обрабатывали на шлифовально-полировальной машине на наждачной бумаге с зернистостью Р600.

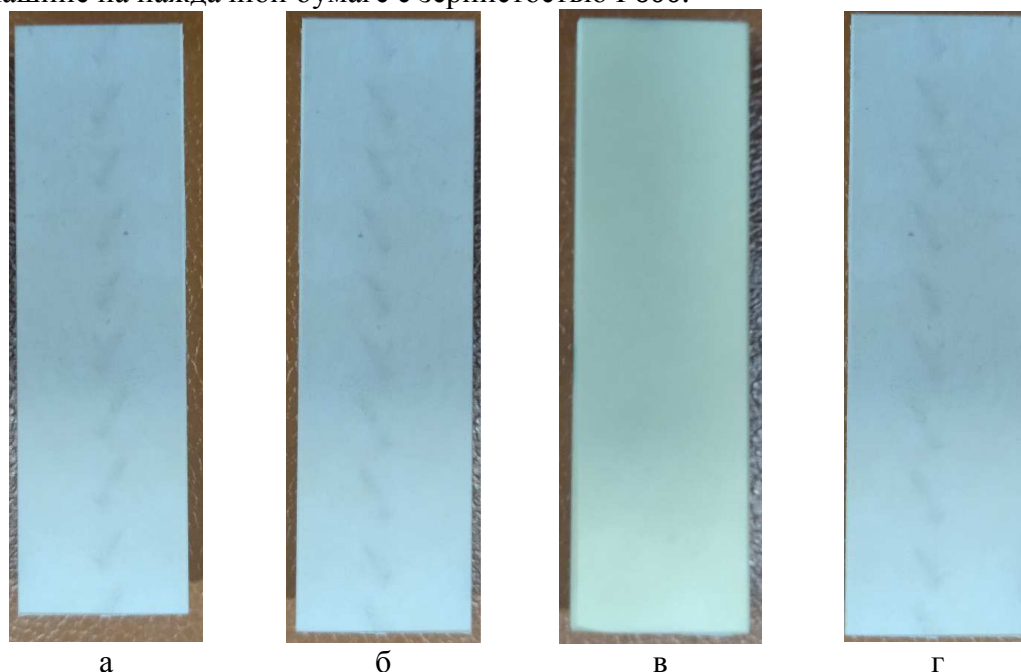


Рис. 1 Образцы полимеров для испытаний: а – ПЭЭК, б – ПЭИ, в – ПФС, г – СВМПЭ

На рисунке 2 представлены фотографии фрагментов поверхностей трения образцов полимеров. Морфологические исследования показали, что образцы ПЭЭК, ПЭИ и ПФС имели продольные риски в направлении скольжения стального контробразца и основным видом их изнашивания было микрорезание, а износ образцов СВМПЭ происходил по усталостному механизму.

На рисунке 3 приведены графики изменения критических давлений заедания от скорости скольжения стального контробразца. Наибольшей стойкостью к заеданию обладали образцы ПЭИ, за ними по уменьшению стойкости к заеданию следовали образцы ПЭЭК, СВМПЭ и ПФС.

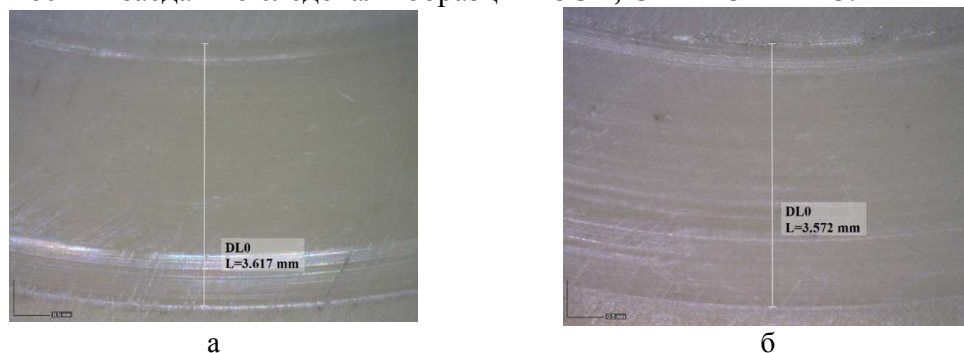
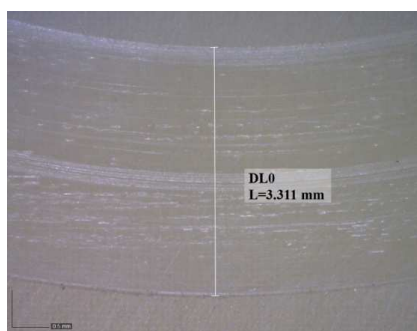
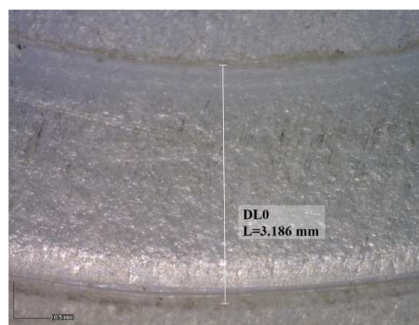


Рис. 2. Морфология поверхности трения полимеров при смазке водой: а – ПЭЭК, б – ПЭИ



В



Г

Рис. 2. Морфология поверхности трения полимеров при смазке водой:
в – ПФС, г – СВМПЭ

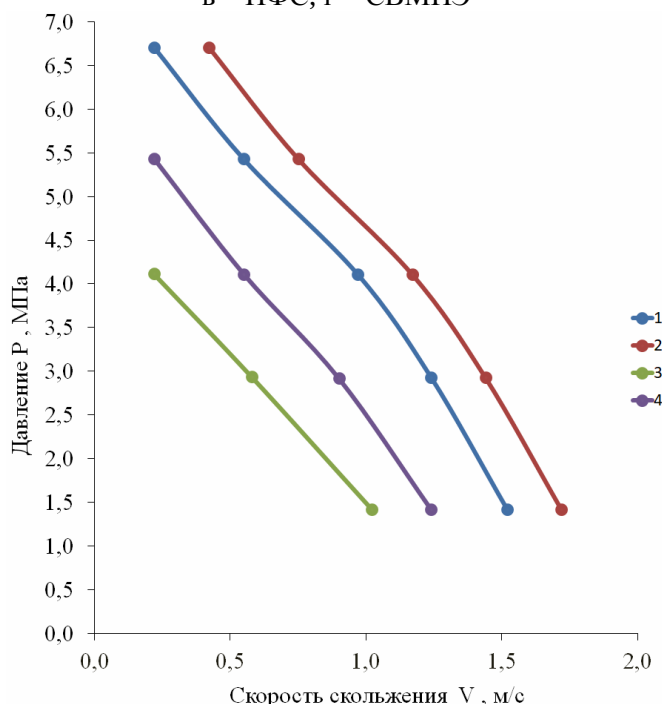


Рис. 3. Изменение критических давлений заедания от скорости скольжения стального контрообразца: 1 – ПЭЭК, 2 – ПЭИ, 3 – ПФС, 4 СВМПЭ

Выводы. Определены критические давления заедания полимерных образцов от скорости скольжения. Установлено, что наибольшая стойкость к заеданию при смазке водой была у образцов ПЭИ, за ними по степени уменьшения стойкости к заеданию следовали образцы ПЭЭК, СВМПЭ и ПФС. Основным видом износа образцов СВМПЭ было усталостное изнашивание, а для остальных образцов микрорезание.

Список литературы / References

1. Tu F., Wang B., Zhao S., Liu M., Zheng J., Li Z., Hu C., Jiang T., Zhang Q. Synergistic Enhancement Effect of Polytetrafluoroethylene and WSe₂ on the

- Tribological Performance of Polyetherimide Composites // Lubricants. 2025, vol. 13, p. 44. doi.org/10.3390/lubricants13020044.
2. Prajapati S.K., Gnanamoorthy R. Dry sliding wear behaviour of 3D printed Polyetheretherketone with varying layer thickness // Journal of Manufacturing Processes. 2025, vol. 148, pp. 1-10. doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.05.022.
 3. Li B., Huang Q., Zhou X., Huang J., Liu B., Liu X. Tribological Mechanism of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Reinforced by Nano-Silica Under Water Lubrication Conditions // Polymer Composites. 2025, pp. 1-16. doi.org/10.1002/pc.70250.

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

Received 06.12.2025