

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА АРМИРОВАННОГО РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ В ПАРЕ СО СТАЛЬЮ В ПРИСУТСТВИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: стойкость к заеданию, давление заедания, скорость скольжения, полиэфирэфиркетон, стекловолокно, углеволокно, графит, политетрафторэтилен.

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты трибологических испытаний по определению задиристости поверхности трения образцов полиэфирэфиркетона усиленных стекловолокном и углеволокном в паре со сталью. Испытания проводились по схеме: «торец стальной втулки контробразца – плоская поверхность образца полимера» с последовательным изменением нагрузки и скорости скольжения в условиях наличия смазки. Результаты показали, что образцы, усиленные стекловолокном, имеют наибольшую стойкость к заеданию, по сравнению с образцами, армированными углеродным волокном и исходным полиэфирэфиркетон. По морфологии поверхностей трения образцов установлено, что основным механизмом изнашивания было микрорезание.

DETERMINATION OF THE ABRASION RESISTANCE OF POLYESTERESTERKETONE REINFORCED WITH VARIOUS FILLERS PAIRED WITH STEEL IN THE PRESENCE OF A LUBRICANT

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: jamming resistance, jamming pressure, sliding speed, polyetheretherketone, fiberglass, carbon fiber, graphite, polytetrafluoroethylene.

Abstract. This paper examines the results of tribological tests to determine the abrasion resistance of polyester ester ketone samples reinforced with glass fiber and carbon fiber paired with steel. The tests were carried out according to the scheme: "the end of the steel sleeve of the countersample is a flat surface of the polymer sample" with a sequential change in the load and sliding speed in the presence of lubrication. The results showed that the samples reinforced with glass fiber have the highest resistance to jamming, compared with the samples reinforced with carbon fiber and the initial polyester ester ketone. According to the morphology of the friction surfaces of the samples, it was found that the main mechanism of wear was micro-cutting.

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) – термопластичный полимер, обладающий рядом ценных эксплуатационных свойств: высокая прочность, высокая термическая и химическая стойкость, повышенная ударная вязкость. Однако ненаполненный ПЭЭК обладает высоким коэффициентом трения, что ограничивает его применение в узлах трения. Для улучшения свойств полимера используют наполнители, например армирующие волокна (углеродные, стеклянные), твердые смазочные наполнители (политетрафторэтилен (ПТФЭ)) или наполнители на основе оксидов металлов

(Al_2O_3 , CaCO_3). Модификация ПЭЭК и расширение области его применения являются актуальной темой исследований. Так, в работе [1] в качестве матрицы для изготовления образцов диаметром 43 мм был выбран порошкообразный полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) с добавлением 10 мас. % политетрафторэтилена (ПТФЭ) и 15 мас. % волокон кристаллического титаната калия (ВТК). В зависимости от наполнителя, образцы были разделены на три группы. В первую группу входили образцы с волоконным армированием, содержащие 5-20 мас. % стекловолокна с кремниевым покрытием (СКП) или 15-35 мас. % стекловолокна (СВ). Во вторую группу входили образцы, содержащие 5-20 мас. % наночастиц оксида титана (TiO_2). В третьей группе находились образцы, содержащие 5-30 мас. % частиц карбоната кальция (CaCO_3) или 1-5 мас. % частиц оксида алюминия (Al_2O_3). Испытания для определения трибологических характеристик проводились в среде масла по схеме: «торец стальной втулки контробразца – плоскость (образец полимера, композита)» при нагрузке 1000 Н, частоте вращения втулки 300 мин^{-1} в течение 60 минут. Втулка была изготовлена из стали GCr15SiMn с внешним диаметром 26 мм и внутренним диаметром 20 мм. По итогам трибологических испытаний наименьший коэффициент трения 0,002 выявлен у образцов, содержащих 5 мас. % частиц Al_2O_3 , что на 93% ниже, чем у чистого ПЭЭК. При этом самая низкая удельная интенсивность изнашивания $0,75 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ получена при испытании образцов, содержащих 15 мас. % CaCO_3 , что на 63,4 % меньше, чем у чистого ПЭЭК.

Образцы композитов были изготовлены в виде втулок с внешним 27,8, внутренним 24,8 диаметрами и высотой 12,8 мм на основе порошкообразного ($1,28 \text{ г/м}^3$) полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) [2] с добавлением 15 мас. % углеродного волокна (УВ) и 5-15 мас. % частиц нитрида бора (BN). Для определения трибологических характеристик были проведены испытания по схеме: «торец втулки (полимерный композит) – плоскость» в среде масла при давлении 1-6 МПа, скорости скольжения 2 м/с в течение 2 часов. Контробразец с микротвердостью 602 HV был изготовлен из стали 45. По результатам испытаний наименьший коэффициент трения 0,021 наблюдался у образцов армированных 15 мас. % УВ и 10 мас. % BN, что в 2,38 раза ниже, чем у образцов из чистого ПЭЭК 0,05. Самая низкая удельная интенсивность изнашивания также наблюдалась у образцов армированных 15 мас. % УВ и 10 мас. % BN и составляла $3\text{-}4 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ в зависимости от приложенного давления, что в 10 раз меньше, чем у образцов из чистого ПЭЭК $35\text{-}45 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{Нм}$.

В работе [3] по исследованию трибологических характеристик антифрикционных материалов были изготовлены образцы с размерами $19,1 \times 12,3 \times 12,3 \text{ мм}$. В первую группу входили образцы из полиэфирэфиркетона ПЭЭК. Во второй группе находились образцы ПЭЭК, содержащие 10 мас. % порошкообразного ($0,3 \text{ г/см}^3$, 50 мкм) политетрафторэтилена (ПТФЭ) (ПЭЭК+10%ПТФЭ). В третьей группе содержались образцы из баббитового сплава ZChSnSb11–6 (Sb – 11%; Cu – 6%) твердостью 30 HB. В четвертую

группу входили образцы из стали с порошковым покрытием свинцовистой бронзы CuSn10Pb10, полученные при высокотемпературном порошковом спекании. Испытания композитов и сплавов на трение и износ были проведены по схеме: «ролик – колодка (образец сплава, полимера, композита)» при нагрузке 68-1515 Н (5-93 МПа) и скорости скольжения 0,1-0,25 и 0,88 м/с. Масло L-СКС320 подавалось в зону трения по 2 капли в минуту. Ролик, изготовленный из стали GCr15 (Ra 0,2 мкм), имел диаметр 49,2 мм. По результатам испытаний наименьший коэффициент трения 0,021 получен при давлении 93 МПа и скорости скольжения 0,25 м/с у образцов ПЭЭК+10%ПТФЭ. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $5,719 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{Нм}$, также получен у образцов ПЭЭК+10%ПТФЭ.

Целью нашей работы являлось определение зависимости давления заедания полимерных образцов от их состава при различных скоростях скольжения в условиях смазки маслом МГЕ-10А.

Образцы диаметром 25 мм и высотой 15 мм были изготовлены из исходного ПЭЭК (ZX324), ПЭЭК, усиленного стекловолокном (ZX324SW) и ПЭЭК, армированного углеволокном (ZX324UG30). Машина трения была оснащена шпинделем с вертикальной осью вращения. Трибологические испытания проводились по схеме: «торец стальной втулки контрообразца – плоская поверхность образца полимера» в среде масла МГЕ-10А. В качестве основных режимов были выбраны давление на поверхность полимерного образца 2,2-8,4 МПа и скорость скольжения стального контрообразца 0,09-0,85 м/с. Давление и скорость скольжения изменялись последовательно, увеличиваясь от минимальных до максимальных значений.

На рисунке 1 представлены снимки поверхности трения образцов. Исследование морфологии поверхностей трения полимерных образцов выявило, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание. В таблице 1 представлены значения критических давлений заедания от скорости скольжения пары трения сталь – полимер.

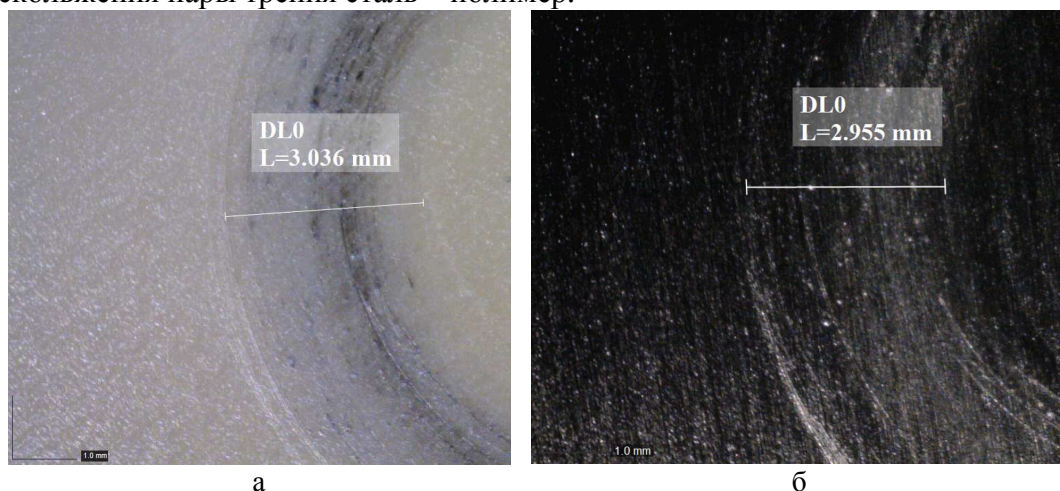
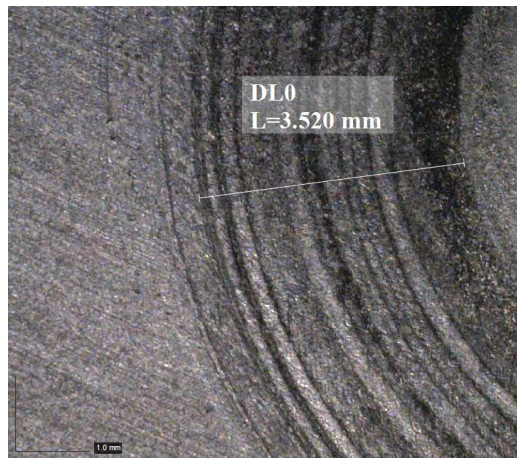


Рис. 1. Снимки поверхности трения образцов: а – ZX324, б – ZX324SW



В

Рис. 1. Снимки поверхности трения образцов: в – ZX324UG30

Табл. 1. Зависимость критических давлений заедания от скорости скольжения

Давление P , МПа	Скорость скольжения до заедания V , м/с		
	ZX324	ZX324SW	ZX324UG30
2,2	0,63	0,85	0,80
4,5	0,35	0,59	0,51
6,3	0,09	0,31	0,09
8,4	без испытаний	0,09	без испытаний

Из представленных данных видно, что максимальной стойкостью к заеданию обладали образцы ZX324SW, за ним по убыванию следовали образцы ZX324UG30 и ZX324. Важно отметить, что заедание образцов ZX324 и ZX324UG30 проходившее при минимальной скорости скольжения 0,09 м/с наступало при достижении давления 6,3 МПа.

Выводы

Исследование показало, что состав полимерных образцов влияет на критическое давление заедания при скольжении в паре трения сталь – полимер. Отмечено, что образцы ZX324SW продемонстрировали наибольшую стойкость к заеданию, за ними следовали образцы ZX324UG30 и ZX324. Установлено, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание.

Список литературы / References

1. Li Y., Wang Z., Cui X., Han X., Zhang J., Tribological Properties of PEEK and Its Composite Material under Oil Lubrication // Lubricants. 2024, vol. 12, p. 264. doi.org/10.3390/lubricants12080264.
2. Li Q., Zhang Y., Liu D., Ma N., Lin G., Sui G., Operational mechanism of BN in carbon fiber reinforced PEEK composites: Load dependent friction behavior under oil

lubricated conditions // Tribology International. 2025, vol. 211, p. 110863. doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110863.

3. Liu W., Wei L., Zhang Y., Chen S., Zhao G., Gao G., Wang H., Investigation of tribological behavior and failure mechanisms of PEEK-based composites, Babbitt alloy, and CuSn10Pb10 bimetal for wind turbine main shaft sliding bearings under simulated operational conditions // Tribology International. 2025, vol. 205, p. 110522. doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110522.

Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Biryukov Vladimir Pavlovich – candidate of technical sciences, leading researcher
Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник	Goryunov Yaroslav Alekseevich – junior researcher
laser-52@yandex.ru	

Received 09.09.2025