

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-50-78-81>

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ К ЗАЕДАНИЮ ИСХОДНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИЭФИРИМИДА В ПАРЕ СО СТАЛЬЮ ПРИ СМАЗКЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ МАСЛОМ

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, полиэфимид, стекловолокно, полимер, усталостное изнашивание, микрорезание.

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию устойчивости к заеданию и оценке морфологии поверхностей трения образцов полиэфимид и его композитов с добавками углеродного и стекловолокна в паре со стальным контробразцом. Испытания проводились на машине трения с вертикальной осью вращения по схеме: «торец стальной втулки контробразца – плоская поверхность образца полимера, композита» при смазке гидравлическим маслом. Нагрузка и скорость скольжения изменялись ступенчато от минимальных к максимальным значениям. Результаты испытаний показали, что образцы, армированные стекловолокном, имели лучшую стойкость к заеданию по сравнению с исходным полиэфимидом. Основным механизмом изнашивания было усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE JAMMING RESISTANCE OF ORIGINAL AND MODIFIED POLYESTERIMIDE PAIRED WITH STEEL UNDER HYDRAULIC OIL LUBRICATION

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, polyetherimide, fiberglass, polymer, microcutting.

Abstract. This study investigates the jamming resistance and evaluates the friction surface morphology of samples polyetherimide and its composites with additives of carbon and glass fiber paired with a steel counter-specimen. Tests were conducted on a friction machine with a vertical rotation axis using the following pattern: "end of the steel bushing of the counter-sample - flat surface of the polymer, composite sample" under hydraulic oil lubrication. The loading force and sliding speed changed stepwise from minimum to maximum values. The test results showed that the glass fiber-reinforced samples had superior galling resistance compared to the original polyetherimide. The main wear mechanism was fatigue wear and, in part, micro-cutting due to separated fibers.

Благодаря своей универсальности, полимеры и композиты с полимерной матрицей нашли широкое применение в промышленности. Особое место среди передовых инженерных полимеров занимает полиэфимид (ПЭИ), который активно изучается и применяется инженерами и исследователями из самых разных отраслей. Композиты на основе порошкообразного (75 мкм) полиимида (ПИ) [1] были исследованы с целью достижения комплекса

механических и трибологических свойств за счет армирования матрицы углеволокном (ПИ+УВ), диаметром 7 и длиной 28-56 мкм, а также одновременного заполнения УВ и углеродными нанотрубками диаметром 10-20 и длиной 30 нм (ПИ+УВ+УНТ). Испытания для определения трибологических характеристик проводились на возвратно-поступательной машине трения по схеме: «шар (сталь) – плоскость (полимер, композит)» при нагрузке 1,5-4,5 Н, скорости скольжения 0,05-0,116 м/с в течение 30 минут. Шар был изготовлен из стали GCr15. По завершении испытаний получено, что наименьший коэффициент трения 0,213 имели образцы, содержавшие ПИ+УВ+УНТ, что в 1,5 раза ниже, чем у образцов, содержавших ПИ+УВ 0,319. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $1,79 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм также получена у образцов, содержавших ПИ+УВ+УНТ, что в 3,6 раз меньше, чем у образцов исходного ПИ $6,44 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм.

Проведено исследование композитных образцов, диаметром 4, шириной 4 и высотой 12 мм, на основе ПЭИ [2], наполненных комбинацией 5 об. % частиц оксида титана (TiO₂) (300 нм), 15 об. % углеволокна (УВ), диаметром 14,5 и длиной 90 мкм, и 5 об. % частиц графита (Гр) (20 мкм) (ПЭИ+TiO₂+УВ+Гр). Также отдельно были изготовлены образцы, армированные 15 об. % УВ и 5 об. % частицами Гр (ПЭИ+УВ+Гр). Трибологические испытания проводились по схеме: «штифт (полимер, композит) – диск (сталь)» при давлении 1-12 МПа, скорости скольжения 1-3 м/с в течение 20 часов. В результате проведенных испытаний получено, что наименьшим коэффициентом трения 0,09 обладали образцы ПЭИ+TiO₂+УВ+Гр, что в 2,7 раз ниже, чем у образцов ПЭИ+УВ+Гр 0,25. Также замечено, что минимальная удельная интенсивность изнашивания $0,3 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм также получена у образцов ПЭИ+TiO₂+УВ+Гр, что в 2,5 раза меньше, чем у образцов ПЭИ+УВ+Гр $0,77 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм.

Композитные образцы, диаметром 8 и высотой 30 мм, на основе ПЭИ (1,28 г/см³) [3], армированные 3-30 об. % коротким углеродным волокном (SCF) (1,8 г/см³), были изготовлены для проведения испытаний на трение и износ. Трибологические испытания проходили в среде масла 5W-40 по схеме: «штифт (композит) – диск (сталь)» при давлении 8-16 МПа, скорости скольжения 1-6 м/с. Диск, с внутренним 50, внешним 70 диаметрами и толщиной 4 мм, был изготовлен из стали 100Cr6. По завершении испытаний установлено, что наименьшим коэффициентом трения 0,095 обладали образцы, содержащие 3 об. % SCF, что в 2,2 раза ниже, чем у образцов, содержащих 30 об. % SCF 0,21. Однако образцы, содержащие 20 об. % SCF обладали минимальной удельной интенсивностью изнашивания.

Целью данной работы являлось определение зависимости давления заедания при различных скоростях скольжения и анализ морфологии поверхностей трения исходного и модифицированного полиэфиримида в условиях смазки гидравлическим маслом МГЕ-10А.

Образцы диаметром 25 и высотой 15 мм были изготовлены из ПЭИ (ZX410) и его композитов с углеродным (ZX410VMT) и стекловолокном

(ZX410GF30). Машина трения была оснащена шпинделем с вертикальной осью вращения. Трибологические испытания проводились по схеме: «торец стальной втулки – плоская поверхность образца полимера, композита» в среде гидравлического масла МГЕ-10А. В качестве основных режимов были выбраны давление на поверхность полимерного образца 2,2-9,0 МПа и скорость скольжения стального контробразца 0,09-1,0 м/с. Давление и скорость скольжения изменялись ступенчато, увеличиваясь от минимальных до максимальных значений.

На рисунке 1 представлены снимки поверхности трения образцов. Исследование морфологии поверхностей трения полимерных образцов выявило, что главным механизмом изнашивания являлось усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон.

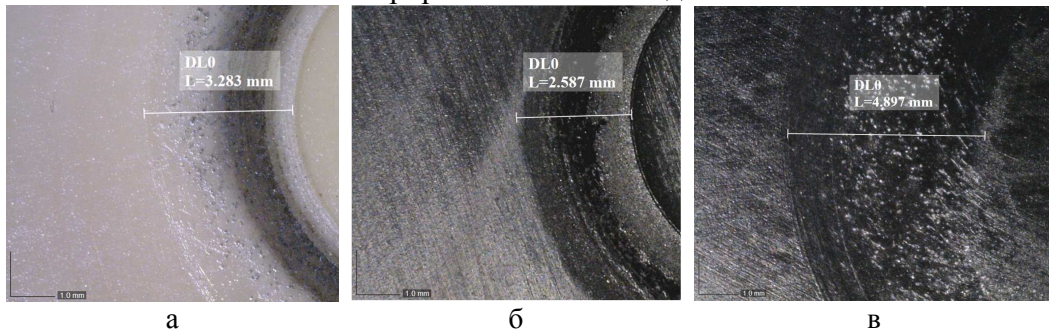


Рис. 1 Снимки поверхности трения образцов: а – ZX410, б – ZX410VMT, в – ZX410GF30

По итогам испытаний была составлена общая таблица. В таблице 1 представлены значения критических давлений заедания от скорости скольжения пары трения сталь – полимер. Образцы ZX410VMT незначительно уступали по задиристости образцам ZX410GF30. Наихудший результат имели образцы ZX410.

Табл. 1. Зависимость критических давлений заедания от скорости скольжения

Давление Р, МПа	Скорость скольжения до заедания V, м/с		
	ZX410	ZX410VMT	ZX410GF30
2,2	0,80	0,90	1,0
4,5	0,46	0,65	0,73
6,3	0,09	0,41	0,51
8,4	без испытаний	0,09	0,09

Выводы

Исследование показало, что состав полимерных образцов влияет на критическое давление заедания при скольжении в паре трения сталь – полимер. Отмечено, что образцы ZX410GF30 продемонстрировали наибольшую стойкость к заеданию, за ними следовали образцы ZX410VMT и

ZX410. Установлено, что основным механизмом изнашивания являлось усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон.

Список литературы / References

1. Chen B., Li X., Li X., Jia Y., Yang J., Yang G., Li C. Friction and Wear Properties of Polyimide-Based Composites with a Multiscale Carbon Fiber-Carbon Nanotube Hybrid // Tribol Lett. 2017, vol. 65, p. 111. doi.org/10.1007/s11249-017-0891-z.
2. Chang L., Zhang Z., Zhang H., Friedrich K. Effect of nanoparticles on the tribological behaviour of short carbon fibre reinforced poly(etherimide) composites // Tribology International. 2005, vol. 38, pp. 966-973. doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.026.
3. Zhang Y.Y., Guan B.W., Liang S.W., Liu Q.X., Li Y.Q., Fu S.Y. Frictional and wear behaviors of short carbon fiber reinforced polyetherimide composites in an oil lubricant environment // Wear. 2025, vol. 542-543, p. 205275. doi.org/10.1016/j.wear.2024.205275.

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 19.09.2025