

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛУНОК ИЗНОСА МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИАМИДА

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: полимер, полиамид, глубина изношенной лунки, ширина изношенной лунки, гидравлическое масло, абразивно-масляная суспензия, износостойкость, микрорезание.
Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты испытаний по определению геометрических параметров изношенных лунок образцов полиамида, наполненных графитом и дисульфидом молибдена в паре со сталью 45. Трибологические испытания проходили по схеме: «колодка (полимер) – ролик (сталь)» с дозированной подачей абразивно-масляной суспензии. Результаты показали, что у образцов полиамида, наполненных графитом, глубина изношенных лунок была в 1,4 раза меньше, чем у образцов полиамида, наполненных дисульфидом молибдена. Основным механизмом изнашивания образцов являлось микрорезание.

DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF WEAR CRATERS OF MODIFIED POLYAMIDE

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: polymer, polyamide, wear crater depth, wear crater width, hydraulic oil, abrasive-oil suspension, wear resistance, microcutting.

Abstract. This paper discusses the results of tests to determine the geometric parameters of worn holes of polyamide samples filled with graphite and molybdenum disulfide paired with steel 45. Tribological tests were carried out according to the scheme: “block (polymer) – ring (steel)” with a dosed supply of abrasive-oil suspension. The results showed that for polyamide samples filled with graphite, the depth of worn holes was 1.4 times less than for polyamide samples filled with molybdenum disulfide. The main wear mechanism of the samples was microcutting.

Для исследования трибологических свойств композитных полимеров были изготовлены образцы с размерами 30×7×4 мм на основе полиамида-6 [1] модифицированные 5-40 мас. % микрокапсулами, состоявшими из карбамидоформальдегидной смолы (КФС) и масла. Отмечено, что твердость образцов, содержавших 30-40 мас. % КФС снизилась на 13-27% в сравнении с исходным полиамидом-6. Испытания на трение и износ проходили по схеме: «колодка (полимер, композит) – ролик (сталь)» при нагрузке 85 Н и скорости скольжения 0,42 м/с в течение 40 минут. Ролик, изготовленный из стали 45, имел внешний радиус 20 мм. По завершении испытаний было установлено, что наименьшим коэффициентом трения 0,14 обладали образцы, содержавшие 40 мас. % КФС, что в 2,6 раз ниже, чем у образцов исходного полиамида-6 0,37. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $0,47 \cdot 10^{-5}$ мм³/Нм была зафиксирована у образцов, содержавших 20 мас. % КФС, что в 12,2 раза меньше,

чем у образцов исходного полиамида-6 $5,75 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Нм}$. В исследовании были изучены трибологические характеристики полиамида-66 и полиамида-6 [2], наполненного 30 мас. % стекловолокном (СВ), 30 мас. % углеволокном (УВ), дисульфидом молибдена (MoS_2) и маслом в паре со сталью 45. Испытания на трение и износ были проведены по схеме: «палец (полимер, композит) – диск (сталь)» при давлении 2-8 МПа и скорости скольжения 0,4 м/с в течение 5-10 часов. Пальчиковые образцы имели диаметр 3 мм. Диск был изготовлен из стали AISI 02. По завершении испытаний при давлении 8 МПа получено, что наименьший коэффициент трения 0,265 имели образцы, наполненные MoS_2 , что в 1,07 раз ниже, чем у образцов исходного полиамида-6 0,285. Отмечено, что у образцов, наполненных 30 мас. % СВ коэффициент трения был в 1,8 раз больше и составлял 0,52 в сравнении с исходным полиамидом-6. Испытания на трение и износ образцов с размерами $10 \times 10 \times 4 \text{ мм}$, изготовленных из полиамида-6 [3], наполненного 15-30 мас. % СВ, 3 мас. % политетрафторэтиленом (ПТФЭ) и 6 мас. % порошком бронзы (БП) проводились на машине трения с использованием схемы: «палец (полимер, композит) – диск с наждачной бумагой». Зернистость наждачной бумаги составляла Р80. Испытания проходили при нагрузке 4-10 Н и скорости скольжения 50 мм/с. Путь трения составил 3,26 метров. По завершении испытаний при нагрузке 10 Н найдено, что наименьшую удельную интенсивность изнашивания $10 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Нм}$ имели образцы исходного полиамида-6, что в 2,4 раза меньше, чем у образцов, наполненных 15 мас. % СВ, 3 мас. % ПТФЭ и 6 мас. % БП $24 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Нм}$.

Целью работы являлось определение геометрических параметров лунок износа полиамида и композитов на его основе при трении о ролик, изготовленный из стали 45.

Образцы с размерами $20 \times 10 \times 10 \text{ мм}$ были изготовлены из полиамида-6, наполненного графитом (ПА-6Гр) и дисульфидом молибдена (ПА-6 MoS). Испытания проводились по схеме: «колодка (полимер, композит) – ролик (сталь)» с дозированной подачей абразивно-масляной суспензии при нагрузке 400 Н и скорости скольжения 0,785 м/с в течение 5 минут. Ролик диаметром 50 и толщиной 10 мм был изготовлен из стали 45 (145 $\text{HV}_{0,1}$). Путь трения, пройденный каждым образцом, составлял 235 м. Подача суспензии на основе гидравлического масла МГЕ-10А, содержавшей 3 мас. % порошок карбида кремния (М28) (20 мкм), осуществлялась со скоростью 40 ± 5 капель/мин. Перед каждым испытанием образующая поверхность ролика обрабатывалась наждачной бумагой зернистостью Р180. Ширину лунок износа определяли с помощью цифрового микроскопа модели АМ413 ML. Глубина изношенной лунки h рассчитывалась на основе результатов анализа морфологии поверхности трения, где полученное значение ширины лунки износа вносилось в формулу [4]:

$$h = b^2 / (12R), \quad (1)$$

где b – ширина лунки износа, мм; R – радиус ролика, мм.

В таблице 1 приведены результаты испытаний полимеров на износ в паре с роликом из стали 45 при постоянной скорости скольжения. Представленные в таблице данные позволяют сделать вывод, что средняя глубина лунок износа

образцов ПА-6Гр, составившая 0,040 мм, была в 1,4 раза меньше, чем у образцов ПА-6МоS 0,057 мм.

Табл. 1. Результаты испытаний эластомеров на износ

№ образца	Материал	Ширина лунки, мм	Глубина лунки, мм	Средняя глубина лунки, мм
1.1	ПА-6Гр	3,535	0,042	0,040
1.2		3,493	0,041	
1.3		3,377	0,038	
2.1	ПА-6МоS	4,158	0,058	0,057
2.2		4,190	0,059	
2.3		4,094	0,056	

Выводы. В результате проведенных испытаний определены геометрические параметры лунок износа полимеров. Наименьшей средней глубиной лунок износа отличались образцы ПА-6, наполненные графитом. Анализ морфологии поверхностей трения полиамидов показал, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2026-0003.

Список литературы / References

1. Gao P.P., Sun Z.B., Mao Y.J., Pan M., Ji X., Tang J.H., Dai K., Lin H., Zhong G.J., Li Z. M., Tribological performances and self-lubricating mechanism of monomer casting nylon-6 composite coatings containing lube base oil-loaded microcapsules // Progress in Organic Coatings. 2021, vol. 160, p. 106528. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106528.
2. Chernets M., Shil'ko S., Kornienko A., Pashechko M., Triboanalysis of Antifrictional Materials Based on Polyamides for Metal-Polymer Sliding Bearings // Journal of Friction and Wear. 2023, vol. 44, pp. 103-113. DOI: 10.3103/S1068366623020034.
3. Rajesh J.J., Bijwe J., Tewari U.S., Influence of fillers on abrasive wear of short glass fibre reinforced polyamide composites // Journal of Materials Science. 2001, vol. 36, pp. 351-356. DOI: 10.1023/A:1004812109247.
4. Davydov R.V., Tikalov A.V., Chulkin S.G., Breki A.D., Efremov L.B., Rud' V.Yu., Bykova N.N., Valiullin L.R., Development of a method for testing the wear resistance of friction pairs based on the synthesis of the method of MV Lomonosov with the improved method of artificial bases // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1942, p. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012058.

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

Received 14.09.2026