

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.459.3.01

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-5-4>

Анализ механических и триботехнических характеристик полиамида и композитов на его основе, применяемых на транспорте



Владимир БИРЮКОВ



Антон ЯКУБОВСКИЙ

Владимир Павлович Бирюков¹,
Антон Алексеевич Якубовский²

^{1,2} Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова, Российская академия наук,
Москва, Россия.

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва,
Россия.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4130-6511>;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9278-6925>.

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9721-2525>;

РИИЦ SPIN-код: 3992-2700.

✉ ¹ laser-52@yandex.ru.

✉ ² anton.at444@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время широкое применение на транспортных средствах находят детали, выполненные из резины и полимеров. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что недостаточно изучено взаимодействие стальных деталей, резины и полимеров при высоких контактных давлениях, при которых наступает заедание в парах трения, воздействия на полимерные материалы и резину свободного и закрепленного абразива. Кроме того, для серийно выпускаемых полиамидов и их композитов малоизученными остаются вопросы влияния давления и скорости скольжения на моменты трения в парах трения со стальными поверхностями.

В работе представлены результаты по определению триботехнических свойств полиамидов ПА-6, маслonaполненных полиамидов с дисульфидом молибдена (ПА-6+MoS₂), полиамидов ПА-6 с графитом (ПА-6+Гр) при трении по стали 40X с различной шероховатостью поверхности, свободным и закрепленным абразивным зерном в сравнении с эталоном, резиной, бутадиен-нитрильным каучуком (БНК).

Триботехнические испытания выполняли по схемам: «широкая сторона плоского образца (полиамид, композит, БНК) – торец кольцевой поверхности втулки контробразца (сталь 40X)» и «кольцевая поверхность резинового диска – широкая сторона плоского образца (полиамид, композит, БНК)» при подаче в зону трения кварцевого песка. Целью исследования было определение зависимости моментов трения от давления и скорости скольжения, давления заедания от скорости скольжения, потери массы образцов при трении по свободному и закрепленному абразивному зерну серийно выпускаемых полиамида ПА-6 и композитов полиамида маслonaполненного с дисульфидом молибдена ПА-6+MoS₂, полиамида с графитом ПА-6+Гр в сравнении с эталонным материалом, резиной, бутадиен-нитрильным каучуком (БНК). Результаты экспериментов могут быть полезны при разработке новых изделий и для замены резиновых прокладок, бронзовых втулок, уплотнений, гофр и других деталей на транспорте и в подвижном составе.

Ключевые слова: подвижной состав, полиамид, коэффициент трения, скорость скольжения, износ, закрепленное абразивное зерно, композиционный полимер, абразивный износ.

Для цитирования: Бирюков В. П., Якубовский А. А. Анализ механических и триботехнических характеристик полиамида и композитов на его основе, применяемых на транспорте // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 5 (114). С. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-5-4>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Полиамид 6 (ПА-6) имеет высокую стабильность размеров, но обладает относительно низкой механической прочностью, жесткостью и износостойкостью по сравнению с металлическими и керамическими материалами, что значительно ограничивает его применение в машиностроении. На сегодняшний день было предпринято много усилий для улучшения физических свойств ПА-6 за счет включения широкого спектра наполнителей, таких как композиты из стекловолокна [1–4] и другие композиты с nanoорганическими наполнителями [5], однако триботехнические характеристики серийно выпускаемых полиамидов и их композитов изучены в недостаточно полной мере. Особое внимание уделяется узлам с подвижными соединениями [6], которые испытывают значительные нагрузки и износ. В этой области обещающие результаты демонстрируют новые конструкционные материалы – армированные композиты на основе полиамида (ПА-6) и фенилона С-1. Исследования [7] показали, что добавление в ПА шести других компонентов может существенно улучшить износостойкость. В частности, композит, включающий сополимер стирола, этилена, бутилена и стирола с привитым малеиновым ангидридом и базальтовое волокно (10 % от общего объема), продемонстрировал наилучшие результаты по износостойкости среди исследованных вариантов.

Также в качестве материала основы [8] использовали ПА-6,6 в который добавляли гексатитанат калия, дополнительно был произведен композит с добавлением толуола. Образцы с добавками толуола обладали лучшей износостойкостью и более гладкой изношенной поверхностью.

Композиционные образцы в другом исследовании [9] были изготовлены из полиамида ПА-6 с добавлением 2, 5, 10, 20, 30 масс. % наноразмерного карбида кремния (SiC) и обладали повышенной износостойкостью по сравнению с исходной матрицей. Кроме того, добавление 30 масс. % SiC снижало коэффициент трения с 0,31 для ПА-6 до 0,12, что позволило значительно улучшить противозносные характеристики. Образец шестерни [10] был изготовлен из нейлона ПА-12 с помощью применения аддитивной технологии с твердостью по Шору 82 D. Шестерни, изготовленные по аддитивной

технологии, показали гораздо более высокую износостойкость по сравнению с отлитыми образцами. Образцы ПА-6 и ПА-6/6 [11] с добавлением воска были изготовлены с помощью литья. Добавление 6 % воска снизило коэффициент трения в два раза, а скорость изнашивания в три раза в сравнении с ПА-6. Полиамид 66 смешали [12] с композитами CNT и CF с массовой долей 1 и 30 %, после чего были изготовлены образцы-пальцы с диаметром 10 мм длиной 20 мм. Интенсивность изнашивания для полимеров ПА-66, ПА-66/CNT, ПА-66/CF составила 42, 19, $10 \times 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$ соответственно. Полиамид ПА-66 смешивали [13] с оксидом графена (C_8O_3) и дисульфидом вольфрама (WS_2) в разном процентном соотношении. По анализу полученных данных можно заключить, что наилучшими свойствами по коэффициентам трения и скоростям изнашивания показал композит содержащий $\text{C}_8\text{O}_3 - 2,5 \%$; $\text{WS}_2 - 1 \%$; ПА-66 – 96,5 %. Образцы [14] были получены из серийно выпускаемых литых полиамидов ПА-6, с дисульфидом молибдена (MoS_2) – ПА-6/ MoS_2 и с твердой смазкой – ПА-6/G. Для сравнения использовали образцы из бронзового сплава. Коэффициенты трения для эталона, полиамида и композитов ПА-6, ПА-6/ MoS_2 , ПА-6/G составили 0,125, 0,511, 0,628, 0,275 соответственно. Потеря массы образцов для бронзового сплава, ПА-6, ПА-6/ MoS_2 , ПА-6/G составила 2,5284, 0,0488, 0,074, 0,0019 мг соответственно. Образцы ПА-6/G имели не самые низкие коэффициенты трения, но показали самую высокую износостойкость.

Для определения триботехнических характеристик были выбраны образцы полиамида-6 (ПА-6) [15] диаметром 8 и высотой 5 мм. Матрица полиамида была модифицирована гидролизным лигнином (ГЛ), углеродным материалом из гидролизного лигнина (УГЛ), бисульфатом графита из гидролизного лигнина (БГЛ) и терморасширенным графитом из гидролизного лигнина (ТРГЛ). Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме «кольцо (сталь 45) по кольцу (полиамид)» при нагрузке 0,33–3 МПа и скорости скольжения 0,048 м/с. Наименьший коэффициент трения 0,065 при нагрузке 2,33 МПа зафиксирован у образцов ПА-6 с добавлением ТРГЛ и содержанием масла в шихте 9 %, что в 4,15 раз ниже, чем у образцов УГЛ 0,27. Установлено, что добавление терморасширенного графита из



гидролизного лигнина способствует снижению коэффициента трения полиамида-6.

В работе [16] были изучены триботехнические характеристики различных образцов в виде шара диаметром 25,4 мм из полиамида-6,6 (ПА-6,6), полиацеталя (ПОМ), полипропилена (ПП), стали AISI 52100 и нитрида кремния (Si_3N_4) в паре со сталью AISI 304. Испытания для определения трибологических характеристик были проведены по схеме «шар – плоскость» при нагрузке 1,85 Н в течение 30, 40 и 90 минут. Количество оборотов контрообразца из стали AISI 304 с размерами $30 \times 35 \times 6$ мм составляло 150 об/мин. Наименьший коэффициент трения 0,18 был зафиксирован у образцов ПА-6,6, что в 2,5 раза ниже, чем у образцов нитрида кремния (0,45). При этом минимальная скорость изнашивания $20,0 \times 10^{-6}$ мм³/Нм выявлена у образцов нитрида кремния, что в 4,9 раз меньше, чем у образцов ПА-6,6 ($98,0 \times 10^{-6}$ мм³/Нм). Самая малая ширина лунки износа 0,5 мкм наблюдалась у образцов ПА-6,6, что в четыре раза меньше, чем у образцов стали AISI 52100 (2,0 мкм). Установлено, что минимальный коэффициент имели образцы полиамида-6,6, за ним на повышение следовали образцы из полипропилена, полиацеталя, стали AISI 52100 и нитрида кремния (Si_3N_4).

В рамках другого исследования были изучены следующие полимеры [17]: полиамид-6G (ПА-6G), политетрафторэтилен (ПТФЭ), полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ), полиацеталь (ПОМ) и полиэфирэфиркетон (ПЕЕК). Каждому из этих полимеров добавлялись различные модификаторы, такие как гранулированное минеральное масло, графит, дисульфид молибдена (MoS_2), бронза и стекловолокно. Для оценки износостойкости использовалась методика испытаний, основанная на взаимодействии шарика из оксида алюминия (Al_2O_3) с плоской поверхностью образца полимера. Испытания проводились при различных нагрузках (10, 20 и 30 Н) в течение 1250 секунд при количестве оборотов образца 450 об/мин. Это позволило получить объективные данные о коэффициенте трения и глубине износа. Результаты испытаний показали, что добавление гранулированного минерального масла в состав ПА-6G значительно улучшает его износостойкость. Наименьший коэффициент трения, равный 0,09 при нагрузке 30 Н, был зафиксирован именно для образцов ПА-6G с мине-

ральным маслом. Это значение в 1,94 раза ниже, чем у образцов ПТФЭ с добавлением графита или бронзы, где коэффициент трения составил 0,175. Кроме того, минимальная глубина лунки износа была зафиксирована у образцов ПА-6G с минеральным маслом и составила 1,2 мкм. Это значение в семь раз меньше, чем у образцов ПТФЭ с графитом, где глубина износа достигала 8,4 мкм.

Для следующего исследования были изготовлены образцы [18] ПА-6 с различными составами, включая добавление 3, 5 и 10 масс. % многослойных синтезированных микрокапсул полисульфона (PSF), оксида графена (GO) и высокотемпературной смазки ВЮ30. Образцы имели диаметр 68 мм и высоту 2 мм. Для оценки трибологических характеристик использовалась схема испытаний «штифт – диск», при которой на образцы действовала нагрузка 50 Н, а диск вращался со скоростью 300 об/мин в течение 30 минут. Результаты испытаний показали, что добавление 5 масс. % многослойных синтезированных микрокапсул значительно улучшает трибологические характеристики ПА-6. Наименьший коэффициент трения, равный 0,028, был зафиксирован именно у образцов с этой добавкой. Это значение в 3,92 раза ниже, чем у ненаполненных образцов, где коэффициент трения составил 0,11. Кроме того, минимальная потеря массы образцов с 5 масс. % микрокапсул составила всего 0,014 г, что в 7,5 раз меньше потери массы ненаполненных образцов (0,105 г). Это свидетельствует о том, что добавление микрокапсул значительно снижает износ материала, что является важным показателем для применения в условиях трения. Также была зафиксирована самая малая глубина лунки износа – 30,4 мкм у образцов с 5 масс. % синтезированных микрокапсул. Это значение в 1,6 раза меньше, чем у ненаполненных образцов, где глубина износа составила 48,7 мкм. Данные результаты указывают на то, что добавление модификаторов не только улучшает коэффициент трения, но и способствует снижению износа материала. Исследование показало, что добавление 5 масс. % многослойных синтезированных микрокапсул полисульфона, оксида графена и высокотемпературной смазки ВЮ30 существенно повышает трибологические характеристики полиамида-6.

Для других трибологических испытаний были выбраны образцы полиамида-6 (ПА-6)

Технические характеристики полимерных материалов и БНК [выполнено авторами]

Марка материала	Твердость, Шор	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа
ПА-6	84 D	1,145	80
ПА-6 с MoS ₂	84 D	1,145	85
ПА-6 с графитом	75 D	1,17	75
Резина БНК	75 A	1,3	25

[19] диаметром 100 и высотой 12 мм. Испытания для определения трибологических испытаний проводились по схеме «штифт (сталь) – диск (полиамид)» при нагрузке 20, 40 и 60 Н и скорости скольжения 0,5 м/с. Путь трения составлял 1 км. В первом цикле испытаний в качестве материала штифта диаметром 21,5 и высотой 5,3 мм применялась сталь AISI52100 с покрытием DLC, во втором – сталь S 235, соответственно. Штифт находился на расстоянии 60 мм от центра диска. Наименьший коэффициент трения 0,22, при нагрузке 30 Н, был зафиксирован у образцов, изготовленных из стали AISI52100 с покрытием DLC, что в 2,13 раз ниже, чем у образцов из стали S 235 (0,47). Установлено, что в паре трения с полиамидом-6 наименьший коэффициент трения показывал образец стали AISI52100 с покрытием DLC.

Целью исследований, представленных в данной статье, было определение триботехнических характеристик серийно выпускаемых полиамида ПА-6 и композитов капролона маслonaполненного с дисульфидом молибдена ПА-6+MoS₂, полиамида с графитом ПА-6+графит (Гр) в сравнении с эталонным материалом, резиной, бутадиен-нитрильным каучуком (БНК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования были изготовлены прямоугольные образцы с размерами 70×20×10 мм, из листовых заготовок, предоставленных компанией ООО «ТехПластПолимер», следующих материалов: полиамид ПА-6, ПА-6, маслonaполненные с дисульфидом молибдена (ПА-6+MoS₂), ПА-6 с графитом (ПА-6+Гр) и БНК (70×20×2 мм), технические характеристики которых представлены в табл. 1. Триботехнические испытания выполняли по схеме: «широкая сторона образца (полиамид, композит, БНК) – кольцевой торец контробразца (сталь 40X)». Для обеспечения

различной шероховатости торца кольцевого стального контробразца, а именно 0,64, 0,16–0,32, 0,08 Ra использовали наждачную бумагу карбида кремния с зернистостью P180, P600, P1200. В качестве смазочного материала использовали гидравлическое масло МГЕ-10. Для испытания на абразивное изнашивание закрепленным зерном использовалась кольцевая оправка, на торец которой была наклеена наждачная бумага зернистостью P120, она прижималась к образцу (полиамид, композит или БНК). Давление на образец составляло 0,9 МПа, что обеспечивало контролируемое давление на рабочую поверхность, длительность испытания – одна минута. Также проводили испытания на абразивное изнашивание свободно движущимися абразивными частицами. В качестве абразивного материала использовался кварцевый песок фракции 0,2–0,6 мм, который подавался в зазор между резиновым диском и испытуемым образцом через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Нормальная нагрузка на образец составляла 15 Н, а время испытания – пять минут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 показано влияние увеличения скорости скольжения на момент трения при обработке наждачной бумагой с различным размером абразивного зерна. С увеличением скоростей скольжения моменты трения для всех исследованных образцов уменьшались. Наименьшими моментами трения обладали образцы ПА-6+Гр при обработке торца втулки стали 40X наждачной бумагой P1200 (рис. 1б). Образцы ПА-6 + MoS₂ имели меньшие моменты трения по сравнению с образцами ПА-6. Наихудшими результатами обладали образцы БНК.

На рис. 2 показаны взаимосвязи изменения моментов трения от давления в паре трения в зависимости от шероховатости тор-



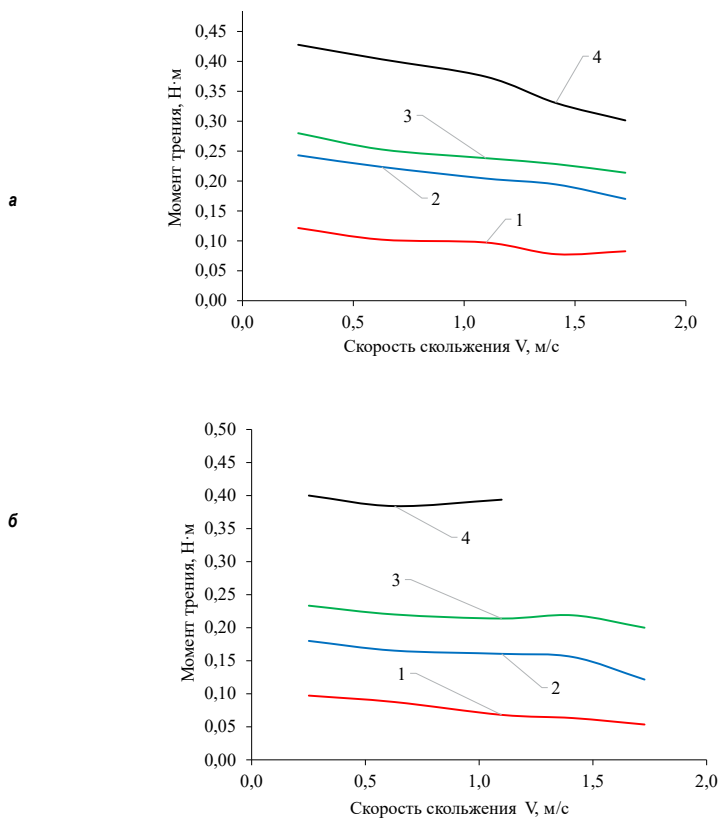


Рис. 1. Влияние увеличения скорости скольжения на момент трения при обработке наждачной бумагой с зернистостью (а) – Р600, (б) – Р1200: 1 – ПА-6+Гр, 2 – ПА-6 + MoS₂, 3 – ПА-6, 4 – БНК [выполнено авторами].

цевой поверхности контробразца втулки из стали 40Х. При более шероховатой поверхности после обработке наждачной бумагой Р180 моменты трения имели максимальные значения (рис. 1а), а минимальные моменты трения получены при обработке наждачной бумагой Р1200 (рис. 1б). Образцы с графитом (кривая 1) имели минимальные моменты трения во всем диапазоне приложенных давлений. За ними следовали образцы с дисульфидом молибдена (кривая 2), далее образцы ПА-6 (кривая 3) и эталон БНК (кривая 4).

Результаты испытаний по определению критических давлений заедания в зависимости от скоростей скольжения пары трения представлены на рис. 3. Наиболее шероховатая поверхность торца втулки при обработке на наждачной бумаге Р180 показала наименьшие критические давления (давления заедания) в зависимости от скоростей скольжения для всех образцов (рис. 3а). Наилучшие результаты по давлениям заедания в зависимости от скоростей скольжения получены при обработке торца втулки наждачной бумагой

Р1200. Наиболее стойкими образцами по критерию заедания были образцы ПА-6+Гр, за ними следовали образцы ПА-6 + MoS₂, ПА-6 и БНК.

На рис. 4 представлены закономерности потери массы образцов 1 – ПА-6, 2 – ПА-6+MoS₂, 3 – ПА-6+Гр, 4 – БНК при испытании на абразивное изнашивание фиксированным зерном. Образцы с графитом имели минимальную потерю массы.

На рис. 5 показаны результаты испытаний на абразивное изнашивание свободным абразивом [20] образцов 1 – ПА-6, 2 – ПА-6+MoS₂, 3 – ПА-6+Гр, 4 – БНК. Наилучшие результаты по абразивной износостойкости были получены для композиционных образцов ПА-6+MoS₂, за ними по возрастанию потери массы следовали образцы ПА-6+Гр, ПА-6 и БНК.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа работ по исследованию полимерных материалов и их композитов, в частности полиамидов, следует, что проведенные ранее исследования не охватывают весь

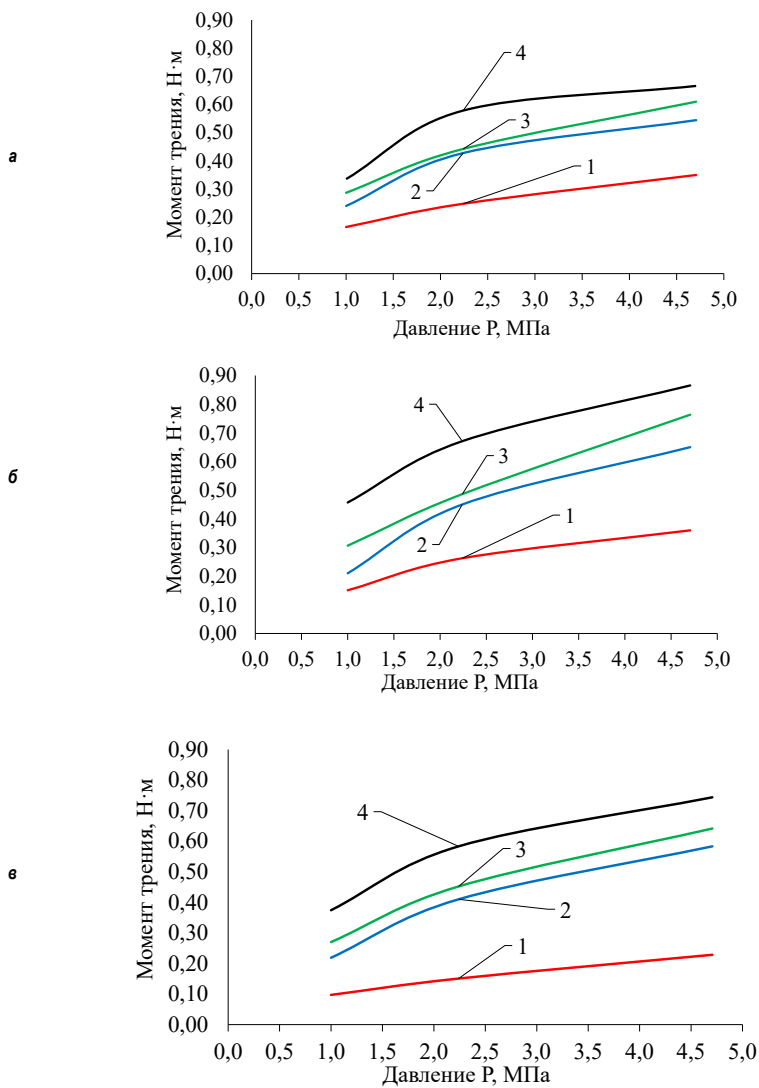


Рис. 2. Изменение момента трения в зависимости от давления при обработке наждачной бумагой с зернистостью (а) – Р180, (б) – Р600, (в) – Р1200: 1-ПА-6+Гр, 2 – ПА-6 + MoS₂, 3 – ПА-6, 4 – БНК [выполнено авторами].

спектр вопросов, связанных с условиями эксплуатации узлов трения и неподвижных соединений, содержащих контакт пары металл – полимерный материал. Полученные результаты наглядно показали, насколько уступают образцы БНК полиамидам и их композитам по потере массы при испытаниях свободным и закрепленным абразивным зерном. Критические давления заедания и скорости скольжения намного выше у полимерных материалов. Полиамидные композиты ПА-6+MoS₂, ПА-6+Гр могут быть использованы в труднодоступных соединениях, где невозможен подвод и замена смазочных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты по абразивной износостойкости незакрепленным абразивным зерном показали преимущество композитов с дисульфидом молибдена по сравнению с образцами, наполненными графитом. Наибольшую абразивную стойкость при изнашивании закрепленным абразивом имели образцы с графитом. В целом образцы полиамида и композитов многократно превысили износостойкость эталона резины БНК. Однако по минимальным моментам трения на первом месте были образцы с графитом, за ними следовали образцы композита с дисульфидом молибдена, полиамида и БНК.



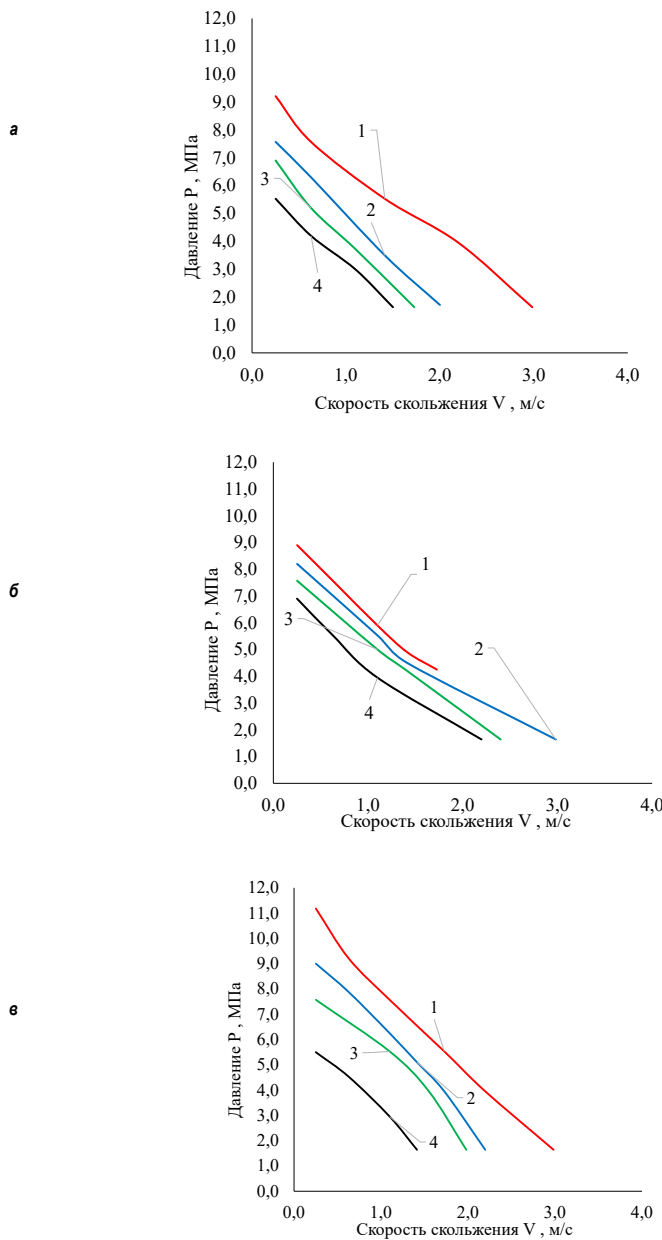


Рис. 3. Зависимость критических давлений от скорости скольжения образца при обработке наждачной бумагой с зернистостью (а) – Р180, (б) – Р600, (в) – Р1200: 1 – ПА-6+Гр, 2 – ПА-6 + MoS₂, 3 – ПА-6, 4 – БНК [выполнено авторами].

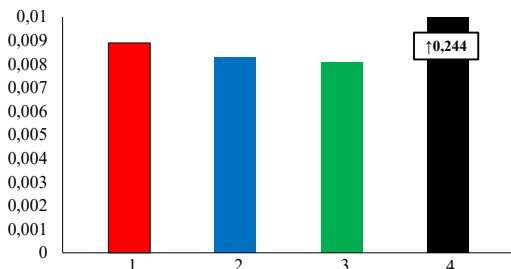


Рис. 4. Потеря массы образцов при испытании фиксированным абразивным зерном: 1 – ПА-6, 2 – ПА-6+MoS₂, 3 – ПА-6+Гр, 4 – БНК [выполнено авторами].

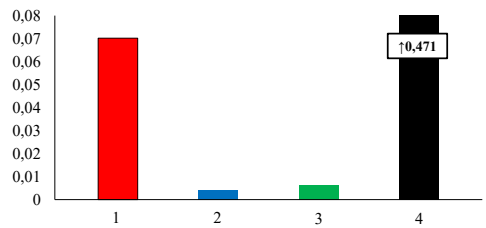


Рис. 5. Потеря массы образцов при испытании на абразивное изнашивание свободным абразивным зерном: 1 – ПА-6, 2 – ПА-6+MoS₂, 3 – ПА-6+Гр, 4 – БНК [выполнено авторами].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Horst, J. J., Salienko, N. V., Spoomaker, J. L. Fiber-matrix debonding stress analysis for short fiber-reinforced materials with matrix plasticity, finite element modelling and experimental verification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, Vol. 29, Iss. 5–6, pp. 525–531. DOI: doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00125-5.
2. Cartledge, H. C. Y., Baillie, C. A. Effects of crystallinity, transcrystallinity and crystal phases of GF/PA on friction and wear mechanisms. *Journal of Materials Science*, 2002, Vol. 37, Iss. 14, pp. 3005–22. DOI: doi.org/10.1023/A:1016081317081.
3. Voyer, J., Klien, S., Velkavrh, I. Static and Dynamic Friction of Pure and Friction-Modified PA6 Polymers in Contact with Steel Surfaces: Influence of Surface Roughness and Environmental Conditions. *Lubricants*, 2019, Vol. 7 (2), pp. 17–31. DOI: doi.org/10.3390/lubricants7020017.
4. Jing Chen, Jiaming Zhu, Yiyue Luo. Achieving enhanced interfacial adhesion and highly oriented structure in PA6/Graphite composites for excellent tribological performance. *Composites Science and Technology*, 2022, Vol. 229, 109719. DOI: doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109719.
5. Tianxi Liu, In Yee Phang, Lu Shen, Shue Yin Chow, Wei-De Zhang. Morphology and mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced nylon-6 composites. *Macromolecules*, 2004, Vol. 37, Iss. 19, pp. 7214–7222. [Электронный ресурс]: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bfe74422fdd68264c3632eefc6a922a1b7183e>. Доступ 23.08.2024.
6. Ткаченко Э. В. Разработка армированных композитов на основе полиамида 6 и фенилона С-1 / Дисс... канд. техн. наук. – Севастополь: СГУ, 2018. – 173 с. [Электронный ресурс]: [https://rguk.ru/upload/iblock/000-aspirantura/defence-archiv/TkachenkoEV/диссертация%20Ткаченко%20\(3\).pdf](https://rguk.ru/upload/iblock/000-aspirantura/defence-archiv/TkachenkoEV/диссертация%20Ткаченко%20(3).pdf). Доступ 22.07.2024.
7. Qiaolie Zheng, Bin Wang, Xiping Li. Microstructural, Mechanical, and Tribological Performances of Composites Prepared via Melt Compounding of Polyamide 6, Basalt Fibers, and Styrene–Ethylene–Butylene–Styrene Copolymer. *MDPI Materials*, 2023, Vol. 16, 3237. DOI: doi.org/10.3390/ma16083237.
8. Hyung Jin Mun, Jae Ik Kim, Ki Dong Nam. Functionalized hexagonal shaped potassium titanate/PA66 composite for improved wear resistance. *Polymer Bulletin*, Vol. 78, 2020, pp. 3959–3971. DOI: doi.org/10.1007/s00289-020-03307-z.
9. Mengbo Qian, Pingan Song, Zhe Qin. Mechanically robust and abrasion-resistant polymer nanocomposites for potential applications as advanced clearance joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, Vol. 126, 105607. DOI: doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105607.
10. Kalani, A., Vadher, J. A., Jani, R. Investigation of thermal and wear behaviour of 3D printed PA-12 nylon polymer spur gears. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2022, Vol. 9, Iss. 3, pp. 1121–1135. DOI: doi.org/10.31202/ecjse.1085328.
11. Unal, H., Yetgin, S. H., Kose, S. Tribological performance of polyamide 6/wax blend for rolling bearing, bushing and gear applications. *The International Journal of Chemistry and Technology*, 2023, Vol. 7, pp. 75–81. DOI: doi.org/10.32571/ijct.1292871.
12. Abdullah, S., Hassan, S. S., Al khazraji, A. N. Investigation of Wear Behavior for Novel Polyamide 66 Composites Under Dry Sliding Conditions. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 2020, Vol. 13, Iss. 1, pp. 9–18. [Электронный ресурс]: https://ijneam.unimap.edu.my/images/PDF/IJNEAM%20JAN%202020%20Vol%2013/Vol_13_No_1_2020_2_9-18.pdf. Доступ 22.07.2024.
13. Phani, K. S., Suman, K. N. S., Ramanjaneyulu, S. Application of a Novel Decision-Making Algorithm in Development of a Nylon Hybrid Composite for Manufacture of Plastic Gears. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2023. DOI: doi.org/10.1007/s40033-023-00506-6.
14. Neis, P. D., Ferreira, N. F., Poletto, J. C., Sukumaran, J., Ando, M., Zhang Y. Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications. *Wear*, 2017, Vol. 376–377, Part B, pp. 1391–1398. DOI: doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.090.
15. Serbinovskiy, M., Popova, O., Finochenko, T., Serbinovskaya, A. Polyamide self-lubricating composites filled with thermolysis products of lignin: composition, structure, properties. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2131, 042020. DOI: doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042020.
16. Ardila, M. A. N., Costa, H. L., de Mello, J. D. B. Influence of the ball material on friction and wear in microabrasion tests. *Wear*, 2020, Vol. 450–451, 203266. DOI: doi.org/10.1016/j.wear.2020.203266.
17. Józwick, J. Assessment of Selected Operating Characteristics of Polymer Composites with Non-Ferrous Materials Used in Friction Pairs. *Manufacturing Technology*, 2019, Vol. 19, Iss. 4, pp. 596–603. DOI: doi.org/10.21062/ujep/340.2019/a/1213-2489/MT/19/4/596.
18. Xin Li, Haiyan Li, Zhike Li, Jing Ji, Sijia Chen, Mingjun Zhang, Beiyao Zha. Preparation of double-walled polysulfone/graphene oxide microcapsules with high thermal stability and their application in self-lubricating polyamide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, Vol. 635, 128111. DOI: doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128111.
19. Sarankó, A., Kalácska, G., Keresztes, R., Comparison of S 235 steel and DLC coated steel using Pin-on-disc method in dry sliding conditions against PA 6 countersurface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 749, 012024. DOI: doi.org/10.1088/1757-899X/749/1/012024.
20. Бирюков В. П., Горюнов Я. А., Двоглазов А. А., Якубовский А. А. Влияние состава полимерного материала на абразивное изнашивание // *Journal of advanced research in technical science*. – 2023. – № 34. – С. 13–16. DOI: doi.org/10.26160/2474-5901-2023-34-13-16. ●

Информация об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН им. Благонравова); доцент, внешний совместитель кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Российского университета транспорта, Москва, Россия, lasar-52@yandex.ru.

Якубовский Антон Алексеевич – младший научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН им. Благонравова); аспирант Российского университета транспорта, Москва, Россия, anton.at444@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023, одобрена после рецензирования 10.10.2024, принята к публикации 12.10.2024.

