НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 629.459.3.01
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-2

Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 3 (94). С. 16–24

Анализ триботехнических свойств и сравнительная оценка полимерных материалов и резины, применяемых в подвижном составе

Михаил КУЛИКОВ

Владимир БИРЮКОВ

Антон ПРИНЦ

Михаил Юрьевич Куликов[1], Владимир Павлович Бирюков[2], Антон Николаевич Принц[3]

[1] Российский университет транспорта, Москва, Россия.
[2, 3] Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.
✉ *[3] tosha.prints.94@mail.ru.*

АННОТАЦИЯ

В узлах трения подвижного состава железных дорог широкое применение находят материалы из резины, которые используются в сальниках, амортизаторах, различных уплотнителях, гофрах, манжетах и иных узлах. В процессе эксплуатации резина подвергается различным механическим воздействиям, которые приводят к износу, трещинам, истиранию, вмятинам, прожогам и прочим повреждениям, что может повлечь за собой отказ всего узла и непредвиденное поступление подвижного состава на неплановый ремонт. Любой отказ на линии и проведение внепланового ремонта несёт за собой большие экономические потери.

На данный момент недостаточно изучен вопрос изнашивания материалов из резины в паре трения со сталью с подачей в зону трения смазки и изнашивания свободным и закреплённым абразивом. Продолжаются исследования по возможности замены изделий из резины на другие полимерные материалы, которые после проведения трибологических испытаний имеют значительно лучшие результаты как по показателям коэффициентов трения, так и по механизму изнашивания. Полученные данные дадут возможность выбрать наиболее оптимальные варианты материалов, которые могут выступить в качестве замены стандартным изделиям из резины в узлах трения подвижного состава.

В работе представлены результаты трибологических испытаний термопластичных полиуретанов (ТПУ), сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полипропилена (ПП2015) в сравнении с резиной на основе бутадиен нитрильного каучука (БНК). Испытания выполнялись по двум схемам «плоскость (исследуемый образец) – втулка» и «плоскость (исследуемый образец) – образующая поверхность резинового диска с подачей в зону трения абразивного зерна».

Целью работы является определение зависимости изменения коэффициентов трения от нагрузки и скорости скольжения, а также зависимости давлений схватывания пар трения от скорости, потери массы образцов после испытаний на износ свободным и закреплённым абразивом, морфологии поверхностей износа и механизмов изнашивания полимерных материалов и резины.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, подвижной состав, коэффициент трения, полимеры, демпфирующий материал, триботехнические свойства, скорость скольжения, абразивное изнашивание.

Для цитирования: Куликов М. Ю., Бирюков В. П., Принц А. Н. Анализ триботехнических свойств и сравнительная оценка полимерных материалов и резины, применяемых в подвижном составе // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 3 (94). С. 16–24. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-2.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

© Куликов М. Ю., Бирюков В. П., Принц А. Н., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Применение и усовершенствование демпфирующих полимерных элементов напрямую связано с улучшением динамических характеристик вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути [напр., 1]. Одной из основных задач является необходимость улучшить динамические свойства упругих демпфирующих элементов.

Для повышения экономической эффективности рассматривают возможности применения демпфирующих полимерных материалов в узлах трения подвижного состава. Технические требования, предъявляемые к современным конструкциям амортизаторов для железнодорожного транспорта, обусловлены условиями их эксплуатации, которые подразумевают надёжную работу при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с окружающей средой, что во многом зависит от типа демпфирующего материала. Следует отметить, что, несмотря на большой опыт исследования физико-механических свойств полимеров и композиционных полимерных материалов, недостаточно изученными остаются вопросы взаимодействия полимеров в паре трения со стальными поверхностями в присутствии смазки, а также изнашивания полимерных материалов свободным и закреплённым абразивом. Поэтому требуется проведение дополнительных исследований для их сравнительной оценки. Проведено исследование [2] подшипника из композитного политетрафторэтилена (ПТФЭ) моделированием износа со стальным валом. Исследовано влияние [3] термического старения масла на фрикционные и износостойкие свойства БНК. Определено, каким образом влияет шероховатость поверхности [4] на трение и износостойкость БНК. В работе [5] выполнено моделирование и экспериментальное исследование износа поступательного гидравлического уплотнения. При набухании БНК стандартным растворителем IRM 903 [6] износ был больше по сравнению с не набухшим образцом в 1,1 раза. Определена износостойкость [7] узлов трения скважинных насосов, имеющих уплотнения из направленно армированных полимерных композитов. Графитовые политетрафторэтиленовые (ПТФЭ) и полиамидные (ПИ) композиты испытывали с инструментальной сталью со смазкой и добавлением мелкодисперсного кварцевого песка [8].

Проведено экспериментальное исследование эксплуатационных характеристик высокоскоростного полимерного упорного подшипника с масляной смазкой [9]. Определено влияние давления и скорости скольжения на коэффициент трения полиуретановых эластомеров различной твёрдости при трении по стали с использованием консистентной смазки [10]. Получены [11] трибологические характеристики СВМПЭ по отношению к сплавам $TiAl_6V_4$ и $CoCr_{28}Mo$.

Целями работы является определение зависимости изменения коэффициентов трения от нагрузки и скорости скольжения термопластичных полиуретанов (ТПУ), сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полипропилена (ПП2015) в сравнении с резиной на основе бутадиен нитрильного каучука (БНК), а также зависимости нагрузки схватывания пар трения от скорости; определение потери массы образцов после испытаний на износ закреплённым и незакреплённым абразивом; исследование морфологии поверхностей износа и механизмов изнашивания полимерных материалов и резины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения испытаний на трение и износ выбраны образцы ТПУ 50D2S10, 60D2S10, СВМПЭ, ПП2015, БНК. Образцы представляли собой пластину с размерами 20×70×2 мм, которая наклеивалась на фанеру с размерами 20×70×12 мм. Трибологические испытания выполняли по схеме «плоскость (исследуемый образец) – втулка» (стальная оправка с наклеенной на её торец наждачной бумагой на основе карбида кремния с зернистостью 120 мкм или втулка стали 40Х твёрдостью HRC 49–54). Торец втулки обрабатывали на наждачной бумаге различной зернистости Р180, Р220, Р600, Р2400. Скорость скольжения и давление на образец изменялись дискретно в интервале 0,1–3,5 м/с и 2–10 МПа соответственно. В качестве смазочного материала при испытаниях полимерных образцов по стали использовали гидравлическое масло МГЕ10А с подачей в зону трения по одной капле в секунду. Испытания на износ свободным абразивом производили при трении плоского образца по образующей поверхности резинового диска. В зону трения подавался кварцевый песок с размерами частиц от 0,2

Таблица 1

Технические характеристики ТПУ[1, 2, 3]

Марка материала	Твёрдость, Шор	Плотность, г/см^3	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
ТПУ 50D2S10	52 D	1,18	45,0	450
ТПУ 60D2S10	60 D	1,18	55,0	320
СВМПЭ	64 D	0,93	25	50
ПП 02015	70 D	0,9	29	400
БНК	75 А	1,3	25	425

[1] Официальный сайт «РТ-ЭПОФЛЕКС». Раздел «Сфера применения». Автомобиль. [Электронный ресурс]: http://rtplp.ru/sfera-primeneniya/. Доступ 13.04.2021.

[2] Официальный сайт «Полимерная компания. Пластпроминвест». Раздел «Продукция». Бален 02015. [Электронный ресурс]: http://ppinvest.ru/produkcia/blok-sopolimeri-propilena-etilena/balen-02015.html. Доступ 13.04.2021.

[3] Официальный сайт Торгово-производственной компании «RUBICOM». Раздел «Информация». Бутадиен-нитрильный каучук (БНКС). [Электронный ресурс]: https://www.rubicom.su/info/articles/kauchuki/butadien-nitrilnyy-kauchuk-bnks/. Доступ 13.04.3021.

до 0,6 мм. Испытания выполняли при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре. Нагрузка при испытаниях составляла 15 Н, продолжительность испытания одного образца составляла 5 минут. После каждого испытания производили при помощи баллона с сухим сжатым воздухом очистку образцов от частиц абразива. Испытывали по три образца каждого материала. Потерю массы образцов определяли на аналитических весах VIBRA HT-220CE. Величина износа определялась как средняя арифметическая по трём образцам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 (а – Р180, б – Р220, в – Р600, г – Р2400) представлены результаты, которые отображают зависимость коэффициента трения от давления и шероховатости поверхности кольцевого образца в зависимости от обработки наждачной бумагой и размеров абразивного зерна. Коэффициент трения БНК резко уменьшался от 0,3–0,35 до 0,2 при давлении 2 МПа (рис. 1а, б) и от 0,2–0,25 до 0,13–0,15 (рис. 1в, г). Для ПП2015 коэффициент трения также уменьшался с повышением давления и уменьшением шероховатости поверхности стали, максимальные его значения 0,08–0,14, а минимальные 0,04–0,1. Коэффициент трения СВМПЭ был более высоким по сравнению с другими материалами при максимальных значениях 0,09–0,15 и минимальных – 0,05–0,11. Полиуретаны ТПУ 50D2S10 имели более низкие коэффициенты трения по сравнению с ТПУ 60D2S10, кроме испытаний с образцами стали, обработанными наждачной бумагой Р180. Минимальные значения коэффициентов трения полиуретанов составили 0,04–0,06 для 50D2S10 и 0,05–0,08 для 60D2S10.

В целом коэффициенты трения в зависимости от давления имели тенденцию к снижению своего значения. Уменьшение шероховатости поверхности стали приводило к снижению коэффициентов трения для всех материалов с повышением давления в паре трения.

На рис. 2 (а – Р180, б – Р2400) показаны закономерности изменения коэффициентов трения от скорости скольжения и шероховатости стального образца. Для всех материалов при повышении скорости скольжения от 0,2 до 0,6 м/с наблюдалось снижение коэффициентов трения. Так для БНК коэффициенты трения с максимальных значений с 0,37 и 0,22 снижались до 0,35 и 0,2 в зависимости от шероховатости поверхности стали (рис. 2а, б) соответственно. Для остальных полимеров начальные значения коэффициентов трения при обработке стали наждачной бумагой Р180 были практически одинаковы и составляли 0,14–0,15. С увеличением скорости скольжения с 0,6 до 1,3 м/с коэффициенты трения всех материалов возрастали и были выше, чем на скорости 0,2 м/с. Коэффициент трения ПП2015 имел максимальные значения 0,14–0,16 (рис. 2а) и минимальные значения 0,09–0,11 (рис. 2б). Коэффициент трения СВМПЭ имел более низкие коэффициенты трения 0,12–0,125 при скоростях скольжения 0,8–1,3 м/с (рис. 2а) и более высокие коэффициенты трения 0,09–0,11 по сравнению с другими полимерами при тех же скоростях. Это может быть связано с более высокой молеку-

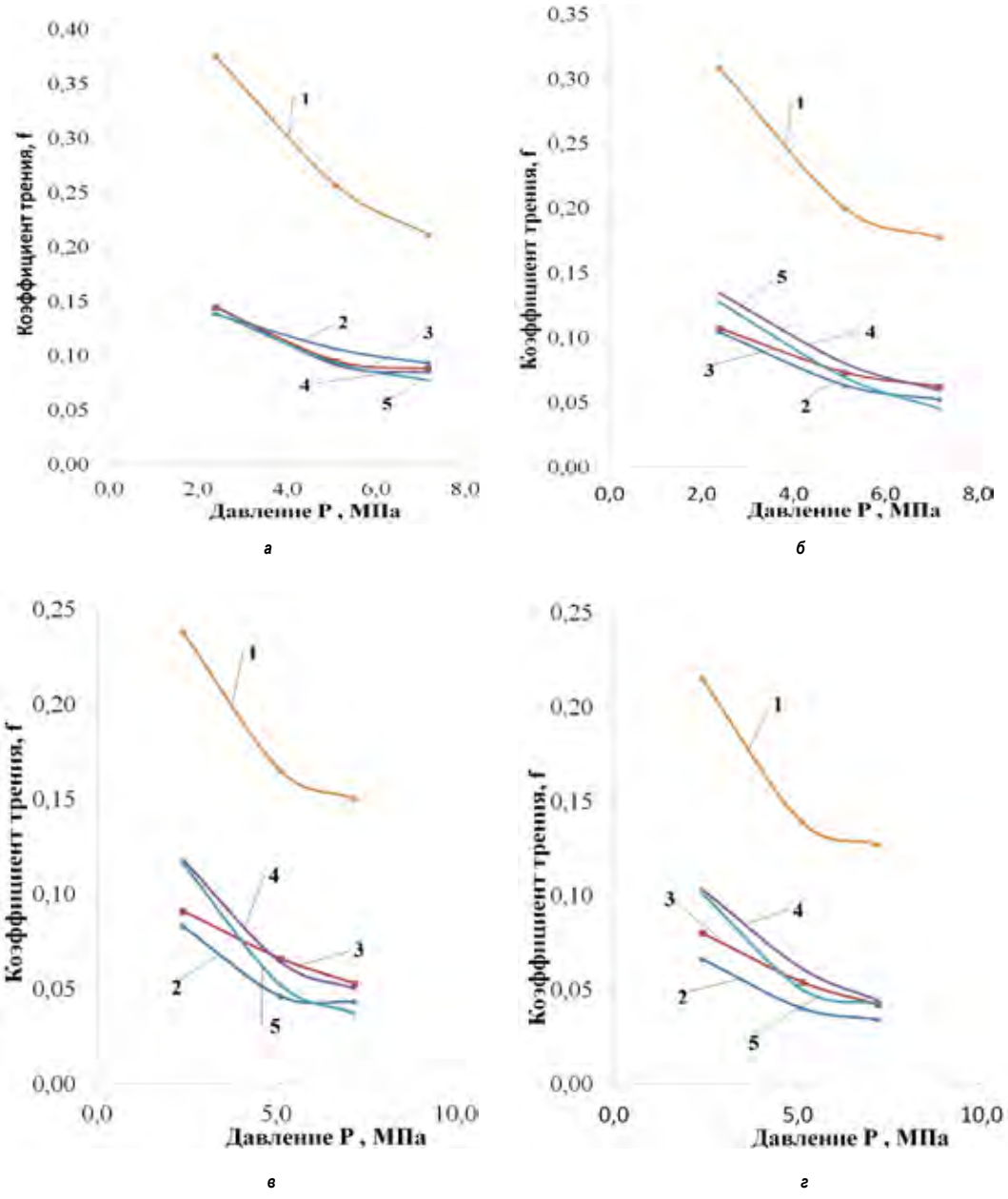
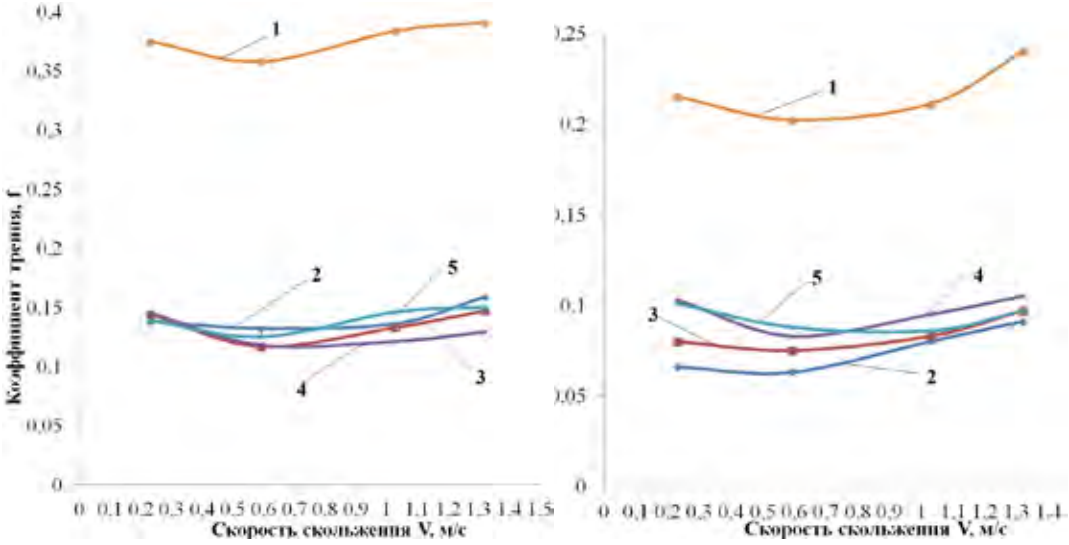


Рис. 1. Зависимости коэффициентов трения от давления по стали 40Х с обработкой наждачной бумагой: а – Р180, б – Р220, в – Р600, г – Р2400. 1 – БНК, 2 – 50D2S10, 3 – 60D2S10, 4 – СВМПЭ, 5 – ПП2015 (выполнено авторами).

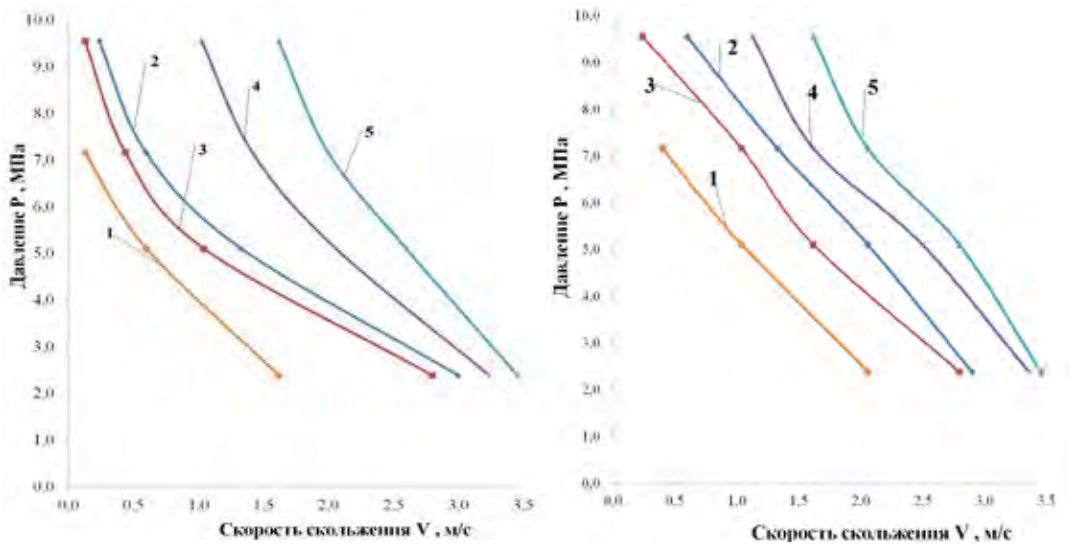
лярной составляющей коэффициента трения при обработке стали наждачной бумагой Р2400, дающей минимальную шероховатость поверхности трения. Полиуретаны ТПУ 50D2S10 при более грубой шероховатости поверхности стали имели коэффициенты трения выше, чем 60D2S10 (рис. 2а). При более гладкой поверхности стали их коэффициенты трения имели минимальные значения 0,06–0,08, тогда как для ТПУ 60D2S10-0,07-0,11. Для всех материалов наблюдалось повышение коэффициентов трения с увеличением скорости выше 0,6 м/с.

На рис. 3 (а – Р180, б – Р2400) представлены зависимости изменения нагрузки заедания от скорости скольжения. Для всех исследуемых материалов с повышением скорости скольжения нагрузка заедания снижалась. Так, для образцов БНК, при более грубой шероховатости поверхности трения стали, при давлении



а *б*

Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения от скорости скольжения по стали 40Х с обработкой наждачной бумагой: а – Р180, б – Р2400. 1 – БНК, 2 – 50D2S10, 3 – 60D2S10, 4 – СВМПЭ, 5 – ПП2015 (выполнено авторами).



а *б*

Рис. 3. Зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения по стали 40Х с обработкой наждачной бумагой: а – Р180, б – Р2400. 1 – БНК, 2 – 50D2S10, 3 – 60D2S10, 4 – СВМПЭ, 5 – ПП2015 (выполнено авторами).

7 МПа, заедание наступало при скорости скольжения 0,2 м/с, а при более гладкой поверхности стали происходило на скорости 0,4 м/с. Полиуретаны ТПУ 50D2S10 имели нагрузки заедания выше, чем образцы ТПУ 60D2S10 во всем диапазоне скоростей. Образцы СВМПЭ имели промежуточные нагрузки заедания между ТПУ и ПП2015. Наиболее высокие нагрузки заедания получены на образцах ПП2015 независимо от шероховатости поверхности торца стальной втулки.

На рис. 4а, б представлены результаты в виде зависимостей коэффициента трения от нормального давления и скорости скольжения при испытании по закреплённому абразиву.

С повышением давления коэффициенты трения уменьшаются для всех типов полимеров и БНК. Полученные значения коэффициентов

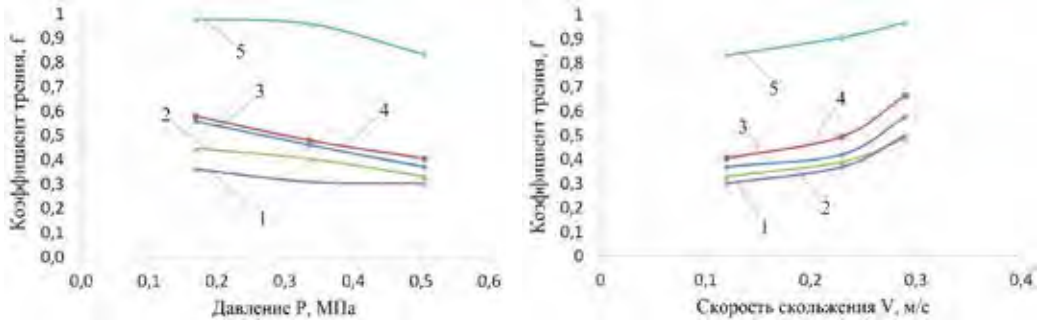


Рис. 4. Зависимость коэффициентов трения полимеров от давления (а) и скорости скольжения (б) по закреплённому абразиву: 1 – ПП2015, 2 – СВМПЭ, 3 – 50D2S10, 4 – 60D2S10, 5 – БНК (выполнено авторами).

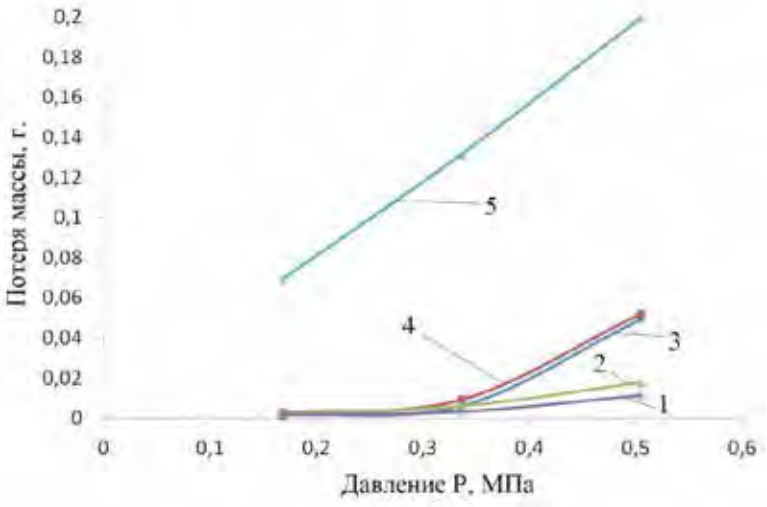


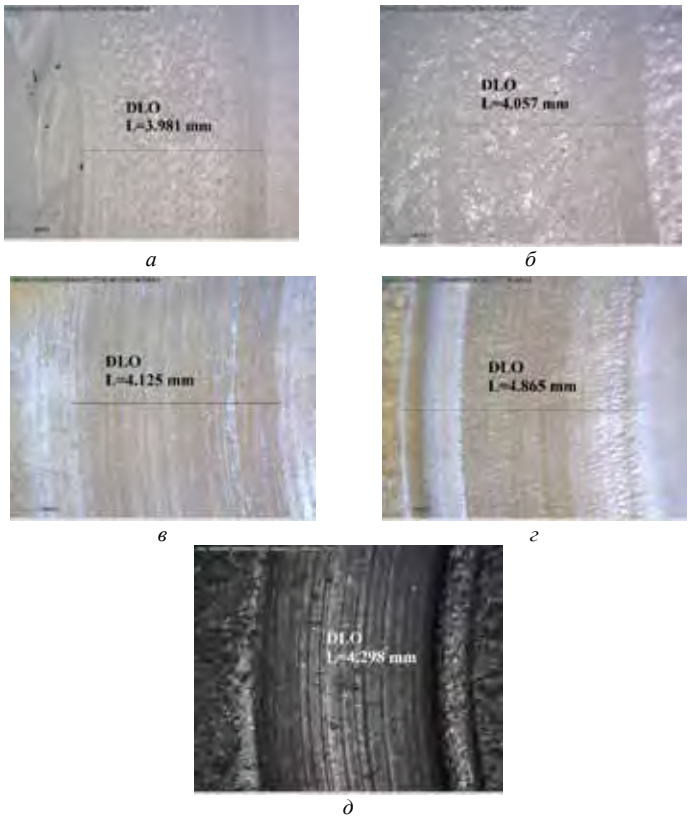
Рис. 5. Зависимость потери массы полимеров от давления при испытании по закреплённому абразиву: 1 – ПП2015, 2 – СВМПЭ, 3 – 50D2S10, 4 – 60D2S10, 5 – БНК (выполнено авторами).

трения можно расположить по мере их увеличения в следующем порядке: 0,3–0,36 для ПП2015, 0,33–0,44 для СВМПЭ, 0,38–0,55 для 50D2S10, 0,4–0,58 для 60D2S10 и 0,85–0,98 для БНК. Повышение скорости скольжения с 0,12 до 0,23 м/с приводило к незначительному росту коэффициентов трения для исследуемых полимеров. Так для ПП2015 и СВМПЭ он увеличивался с 0,32 до 0,36. При дальнейшем увеличении скорости до 0,3 м/с коэффициент трения составил 0,5 и 0,49 для ПП2015 и СВМПЭ соответственно. Коэффициент трения резины БНК 0,8–0,9 возрастал пропорционально во всем диапазоне скоростей скольжения.

На рис. 5. показаны потери массы образцов от изменения величины давления в контакте при испытаниях.

Для резин БНК потеря массы увеличивалась пропорционально давлению. Износ образцов ТПУ при низких давлениях до 0,34 МПа незначителен, при дальнейшем увеличении давления до 0,54 МПа для 50D2S10, 60D2S10 возрастает с 0,01 до 0,04 г. Минимальная потеря массы получена для полипропилена ПП2015. На рис. 6 приведена морфология поверхностей трения образцов.

Поверхности трения полипропилена ПП02015 и СВМПЭ с минимальной величиной изнашивания 0,003 и 0,004 г соответственно не имели глубоких рисок или канавок в направлении скольжения закреплённого абразивного зерна. Волнистость поверхности свидетельствует о постепенном накоплении повреждений и отделении частиц износа по



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 6. Морфология поверхностей трения полимеров и резины БНК при испытании по закреплённому абразиву: а – ПП2015, б – СВМПЭ, в – 50DS210, г – 60DS2010, д – БНК (выполнено авторами).

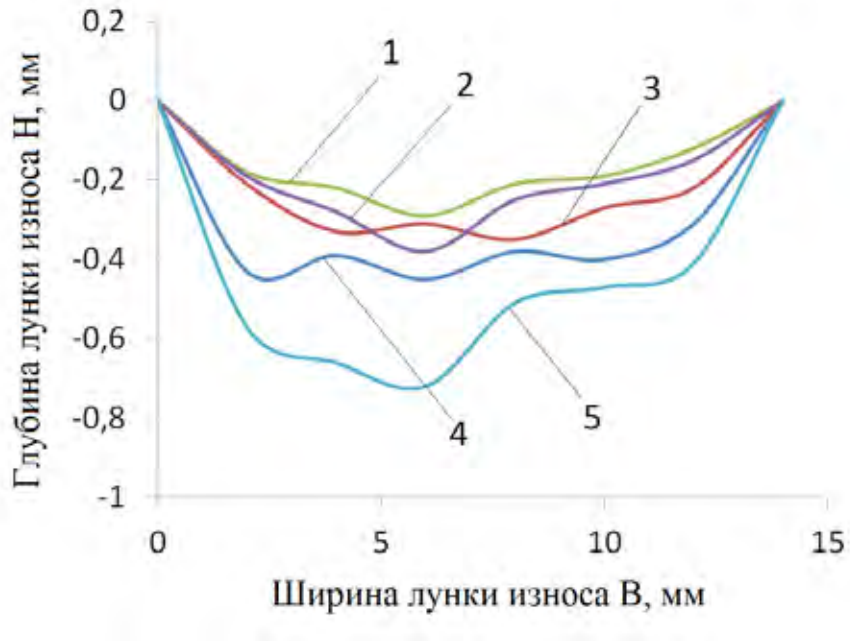
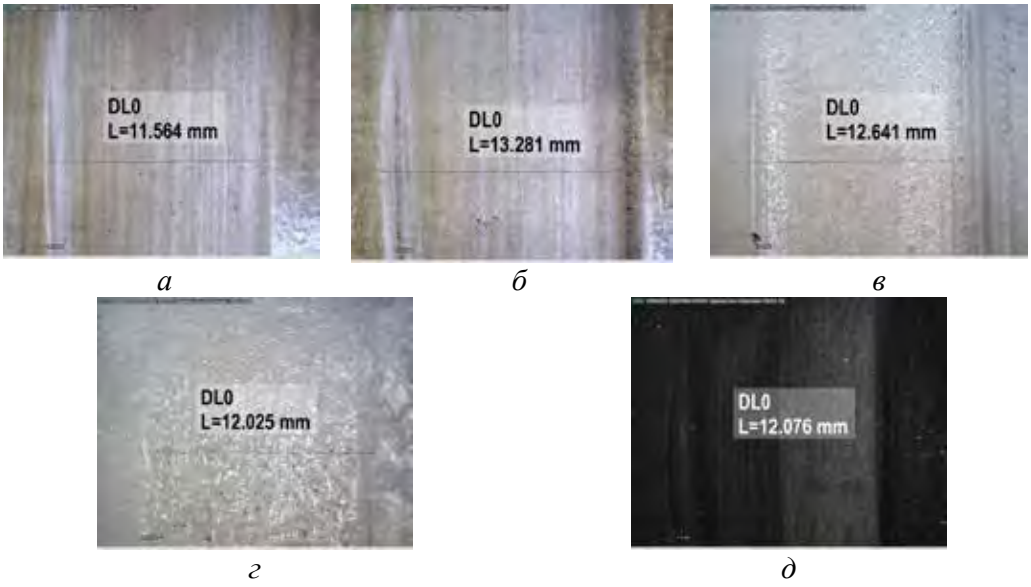


Рис. 7. Профили лунок износа материалов: 1 – 50DS210, 2 – 60DS2010, 3 – СВМПЭ, 4 – ПП2015, 5 – БНК (выполнено авторами).



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 8. Фрагменты лунок износа материалов при трении по свободному абразиву.

усталостному механизму. Поверхности трения образцов 50DS210 и БНК на всем протяжении имели риски в направлении скольжения. Можно предположить, что превалирующим режимом изнашивания было микрорезание. У образцов 60DS2010 высота волн была минимальная, а характер изнашивания можно отнести к усталостному механизму износа при трении по закреплённому абразивному зерну.

На рис. 7 показаны профили лунок износа полимерных материалов и БНК при испытании незакреплённым абразивом.

В отличие от испытаний закреплённым абразивом минимальную потерю массы показали образцы ТПУ50DS210 и 60DS2010. Образцы СВМПЭ переместились на третье место. Наибольшую потерю массы показали образцы ПП2015 и БНК соответственно. На рис. 8 представлены фрагменты лунок износа материалов при трении по свободному абразиву.

Поверхности трения 50DS210, 60DS2010 и БНК имели продольные риски в направлении скольжения абразивного зерна, и механизм изнашивания можно отнести к микрорезанию. Волнистость поверхности образцов СВМПЭ и ПП2015 свидетельствует о постепенном накоплении повреждений и отделении частиц износа по усталостному механизму. Различные результаты испытаний при трении свободным и закреплённым абразивным зерном свидетельствуют о том, что наждачная бумага при испытании ТПУ ПП2015 за счёт адгезии покрывалась полимерными частицами и интенсивность изнашивания и коэффициент трения снижались. Для полимеров 50DS210, 60DS2010 минимальная потеря массы при трении свободным абразивом свидетельствовала о том, что их твёрдость выше, чем резинового диска, и часть абразивных частиц просто вдавливалась в образующую поверхность диска. Несмотря на различные результаты оба метода испытаний дополнили друг друга и дали полную характеристику полимерных материалов, эксплуатируемых в узлах машин и механизмов, когда возможно воздействие на поверхности трения закреплённым и свободным абразивным зерном.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ проведённых зарубежными авторами исследований показывает тенденцию к расширению применения полимерных материалов в парах трения со сталями в присутствии жидких и пластичных смазочных материалов. Образцы БНК уступают по всем показателям полиуретанам ТПУ, СВММПЭ и ПП2015. В настоящее время в значительном количестве узлов трения подвижного состава

применяются резиновые уплотнения, амортизаторы, прокладки, гофры, которые могут быть успешно заменены на более надёжные материалы, обладающие низкими коэффициентами трения и более высокими нагрузками заедания по сравнению с БНК. Применение ТПУ, СВМПЭ и ПП2015 позволит повысить надёжность и ресурс работы узлов трения подвижного состава. Материалы типа ТПУ 50DS210, 60DS2010 и СВМПЭ могут быть применены в дальнейшем в узлах трения в качестве замены резиновых изделий для изготовления манжет, сальников, прокладок и гофр. Полипропилены типа ПП2015 возможно использовать вместо резины в панелях управления, поворотных механизмах и устройствах внутри подвижного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены закономерности изменения коэффициентов трения полиуретанов 50D2S10, 60D2S10, СВМПЭ и ПП2015 от давления и скорости скольжения, которые показали, что эти материалы превосходят БНК независимо от шероховатости поверхности стали 40Х. Нагрузка заедания предлагаемых полимерных материалов выше, чем у БНК, во всем диапазоне исследованных нагрузок и скоростей.

По результатам испытаний закреплённым и свободным абразивом получены закономерности изменения коэффициентов трения и потери массы образцов от давления. Коэффициент трения полипропилена ПП2015 имел значения 0,3–036, тогда как для БНК в 2,5 раза больше и составлял 0,85–1,0 при трении по закреплённому абразиву. Устойчивый результат по относительной потере массы показали образцы СВМПЭ при испытании свободным и закреплённым абразивом. Наименьший износ имели образцы ПП2015 и 50DS210, 60DS2010 при трении по закреплённому и свободному абразиву соответственно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курзина Е. Г. Совершенствование демпфирующих упругих полимерных элементов ходовых частей грузового вагона // Дис… канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 2019. – 228 с.

2. Tao, Guan; Zhipeng, Hui; Yong, Gao; Kun, Yang. Condition monitoring of PTFE composite material bearing through the correlation between lubricant condition and wear simulation. Fourth International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2017, pp. 1028−1033. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047896.

3. Bingqi, Jiang; Xiaohong, Jia; Zhugang, Wang; Tao, Wange; Fei, Guo; Yuming, Wang. Influence of Thermal Aging in Oil on the Friction and Wear Properties of Nitrile Butadiene Rubber. Tribology Letters, 2019, pp. 67–86. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-019-1201-8.

4. Dong, Feng; Ming-xeu, Shen; Xu-dong, Peng; Xiang-kai, Meng. Surface Roughness Effect on the Friction and Wear Behaviour of Acrylonitrile–Butadiene Rubber (NBR) Under Oil Lubrication. Tribology Letters, 2017, pp. 65–10. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-016-0793-5.

5. Angerhausen, J., Woyciniuk, M., Murrenhoff, H. [*et al*]. Simulation and experimental validation of translational hydraulic seal wear. Tribology international, 2019, Vol. 134, pp. 296−307. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.048.

6. Balasooriya, W., Schrittesser, B., Chao, Wang; Hausberger, A., Pinter, G., Schwarz, T. Tribological Behavior of HNBR in Oil and Gas Field Applications. Lubricants, 2018, pp. 6–10. DOI:https://doi.org/10.3390/lubricants6010020.

7. Krasnyi, V. A., Maksarov, V. V. Improving wear resistance of friction assemblies of oil-well pumps having seals from directionally reinforced polymer composites. Chemical and Petroleum Engineering, 2017, Vol. 53, pp. 121−125. DOI: https://doi.org/10.1007/s10556-017-0306-x.

8. Gheisari, R., Polycarpou, A. A. Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions. Wear, 2019, pp. 436–437, 203044. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203044.

9. Jie, Zhou; Blair, B., Argires, J. [*et al*]. Experimental Performance Study of a High Speed Oil Lubricated Polymer Thrust Bearing. Lubricants, 2015, Vol. 3, pp. 3−13. DOI: https://doi.org/10.3390/lubricants3010003.

10. Capanidis, D., Sokolska, J. Effect of pressure and sliding speed on the friction coefficient of polyurethane elastomers (EPUR) of different hardness during their friction on steel when lubricating with grease. Tribologia, 2019, Vol. 5, pp. 33−41. DOI: 10.5604/01.3001.0013.6559.

11. Guezmil, M., Bensalah, W., Mezlini, S. Tribological behavior of UHMWPE against $TiAl_6V_4$ and $CoCr_{28}Mo$ alloys under dry and lubricated conditions. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedica Materials, 2016, Vol. 63, pp. 375−385. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.002.

12. Принц А. Н., Бирюков В. П. Исследование триботехнических характеристик полимерных материалов при абразивном изнашивании // XXXII Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения: Сб. трудов конференции. – М., 2021. – С. 228−234. ●

Информация об авторах:

***Куликов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, muk.56@mail.ru.*

***Бирюков Владимир Павлович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, laser-52@yandex.ru.*

***Принц Антон Николаевич** – младший научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия, tosha.prints.94@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 13.04.2021, одобрена после рецензирования 15.06.2021, принята к публикации 27.06.2021.