

И. В. Шкалей

ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА «МОРОЗОСТОЙКАЯ РЕЗИНА – СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН» *

Аннотация. В суровых условиях Крайнего Севера влияние старения полимеров на их свойства актуально ввиду длительного воздействия различных факторов окружающей среды, приводящих к деструкции полимеров. В работе проведены испытания на трение и износ по схеме, имитирующей узел уплотнения двухслойного композита «резина – сверхвысокомолекулярный полиэтилен» при различных нагрузках, скоростях скольжения и температурах. Оценено влияние климатического и термического старения на фрикционные свойства и износостойкость двухслойного композита. Получено, что коэффициент трения зависит от скорости скольжения, нагрузки и внешней температуры. Старение материала приводит к снижению коэффициента трения. Износостойкость материала увеличивается на 25 % на втором месяце старения и не изменяется за последующие четыре. При ускоренных испытаниях на старение износ снижается на 15 %. Можно сделать вывод о возможности использования материала в узлах трения в течение срока, ограниченного шестью месяцами климатического старения, а в сопряжениях, защищенных от солнечного излучения, может использоваться без ограничений по времени.

Ключевые слова: резина, старение, бутадиен-нитрильный каучук, покрытие, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полимерный композит, трение, износ.

Для цитирования: Шкалей, И. В. Влияние старения на триботехнические характеристики двухслойного композита «морозостойкая резина – сверхвысокомолекулярный полиэтилен» / И. В. Шкалей // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 231–238. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_231.

Введение

Покрытия являются одним из способов улучшить триботехнические характеристики материалов, в том числе эластомеров [1]. Данный способ поверхностной модификации предлагается использовать для резиновых уплотнительных материалов, стойких к условиям низких температур Крайнего Севера. Значительный интерес в этом случае представляет использование сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в качестве покрытия. Резиновые уплотнения подвижных соединений обладают высокоэластическими характеристиками, стойкостью к воздействию рабочих сред и демпфирующими свойствами, однако имеют высокий коэффициент трения в паре с большинством используемых материалов контртел и низкую износостойкость [2]. СВМПЭ так же, как и морозостойкая резина, пригоден для эксплуатации при низких температурах [3] и отличается износостойкостью, низким коэффициентом трения, высокой прочностью и способностью выдерживать высокие изгибные деформации. Такое сочетание материалов обеспечивает как демпфирующую способность композита за счет резины, так и долговечность за счет поверхностной модификации [4].

Вследствие продолжительного влияния низких или высоких температур (и других факторов окружающей среды, например, кислорода и светового потока) происходит изменение свойств полимерных материалов, так называемый процесс старения, в результате протекания реакций, которые сопровождаются деструкцией полимера. В [5, 6] показано, что СВМПЭ подвержен старению, сопровождающемуся изменением механических характеристик. Внешние условия, такие как температура и нагрузочно-скоростные параметры, играют важную роль при исследовании трения полимеров, поэтому эффект старения влияет на триботехнические свойства в большей или меньшей степени в зависимости от условий фрикционного взаимодействия. В [7] показано, что при испытаниях СВМПЭ в паре со сталью по схеме «палец – диск», увеличение скорости скольжения приводит к росту коэффициента трения, а повышение давления – к незначительному снижению. Пара трения «СВМПЭ – стальной шарик» в условиях возвратно-поступательного движения имеет немонотонную зависимость коэффициента трения от внешней температуры испытаний в диапазоне от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. В [9] на основе эксперимента по скольжению стального шарика по диску из СВМПЭ и моделирования процесса продемонстрировано,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00484).

что сшивание тонкого слоя СВМПЭ с резиной позволяет получить демпфирующий материал с низким коэффициентом трения.

Целью данной работы является определение зависимости коэффициента трения «резина – СВМПЭ» в паре со стальным диском от нагрузки и скорости в условиях конформного контакта «кольцо – диск», моделирующего схему уплотнительного узла трения, с учетом старения полимеров и внешней температуры, характерной для климатических условий северных регионов РФ.

Материалы

Двухслойный полимерный композит представляет собой покрытие из СВМПЭ (GUR-4022, Celanese, Китай) на подложке из резины на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНКС-18, СИБУР, Россия).

Смешение ингредиентов резиновой смеси проводилось в лабораторном резиносмесителе Plastograph EC Plus (Brabender, Германия) в течение 20 минут при скорости вращения валков 25 об/мин и 40 °С. В рецептуре резиновой смеси использовались следующие ингредиенты, приведенные в последовательности введения: БНКС-18 (100 мас. ч.), стеариновая кислота (1,5 мас. ч.), технический углерод (50 мас. ч.), оксид цинка (5 мас. ч.), каптакс (1,5 мас. ч.), дифенилгуанидин (0,5 мас. ч.) и сера (1 мас. ч.).

Климатическое старение проводилось на образцах со СВМПЭ слоем толщиной 3,5–4 мм, для испытаний на ускоренное старение использовались образцы с толщиной покрытия 600 мкм. Образцы изготавливаются в кольцевой пресс-форме и имеют следующие размеры: внешний и внутренний диаметры равны 54 и 40 мм соответственно, высота 8 мм. При изготовлении сначала проводится предварительное прессование порошка СВМПЭ (10 МПа, 5 минут), затем поверх укладывается резиновая смесь. Пресс-форма закрывается и проводится дальнейшее совместное горячее прессование в термогидравлическом прессе (Импульс, Россия) при 155 °С и 10 МПа в течение 20 минут.

Методы исследования

Испытания на ускоренное старение и теплостойкость предназначены для оценки относительной устойчивости полимера к старению с течением времени. Определение стойкости двухслойного полимерного композита к термическому старению проводили в соответствии с ГОСТ ISO 188-2013 [10]. Образцы помещали в термостат при температуре 100 °С и выдерживали в течение 72 часов. После старения образцы вынимали из термостата и оставляли кондиционировать не менее 16 часов.

Климатическое старение проводилось в условиях, характерных для г. Якутска, с учетом воздействия солнечной радиации, температуры окружающей среды, влажности воздуха и других факторов. Экспозиция проводилась на стендах, расположенных под углом наклона к линии горизонта 45°, обеспечивающим ориентацию образцов на юг, с апреля по сентябрь 2024 г., в период высокой прозрачности атмосферы и инсоляции. Средняя температура окружающей среды за прошедший период экспозиции была близка к среднегодовым значениям (минимальная температура составила –3,6 °С, максимальная – +20,4 °С).

Трибологические испытания были проведены на лабораторном трибометре UMT-2 (Cetr, США) по кинематической схеме однонаправленного скольжения кольца по неподвижному диску вокруг их общей оси вращения. Контактное взаимодействие осуществлялось торцевой поверхностью кольца (исследуемый материал) по плоскости диска ($R_a \geq 0,04$ мкм, сталь 08X18H10) диаметром 65 мм и толщиной 2 мм. В процессе единичного испытания с постоянными нагрузкой и скоростью образец вращался на 10 оборотов (путь трения 1,5 м). Для серии испытаний задавалась нормальная нагрузка и варьировалась скорость скольжения: 0,1, 0,2, 0,4 и 0,6 м/с. Тесты проводились при значениях нормальной нагрузки: 50, 100, 200, 400 и 700 Н (0,05–0,7 МПа). В испытательной камере устанавливались температуры: –20, 23 (комнатная) и +60 °С. Для каждой фиксированной комбинации параметров (скорость, нагрузка, температура) было сделано три теста.

Изучение стойкости к абразивному изнашиванию было проведено по методике искусственных баз [11, 12] при следующих параметрах испытания: нагрузка – 100 Н, линейная скорость скольжения – 0,1 м/с, путь трения – 30 м. На поверхность диска (контртела) наклеивалась наждачная бумага зернистостью 250 мкм. По радиусу образцов наносились прямоугольные углубления (под углом 120 градусов относительно оси кольца). Показателем скорости износа являлась разница линейного размера, отсчитываемого от основания базы до трущейся поверхности, между тестами, отнесенная к пути трения. Измерение проводилось после каждого теста с помощью бесконтактного оптического профилометра.

Снимки поверхности образцов с соответствующей ей шероховатостью (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 [13]) были получены на оптическом бесконтактном профилометре S Neox 3D (Sensofar, Испания). Для этого был использован объектив 10X, конфокальный режим и автоматическая сшивка единичных кадров в область установленного размера.

Результаты и их обсуждение

Исследуемый материал может быть использован в узлах трения, как защищенных от воздействия солнечной радиации и других климатических факторов, так и подверженных ему. Широко используется для изучения тепловых и термических свойств полимеров, а также влияния этих свойств на их эксплуатационные характеристики, ускоренный вид испытаний – термическое старение. Однако такое воздушно-тепловое старение не может в полной мере использоваться для имитации естественного старения вследствие невозможности обеспечения воздействия на полимер солнечной радиации, температуры окружающей среды, влажности воздуха и других факторов, поэтому необходимо рассмотреть трибологическое поведение материала после климатического старения.

Влияние термического старения на зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, нагрузки и температуры представлено на рис. 1.

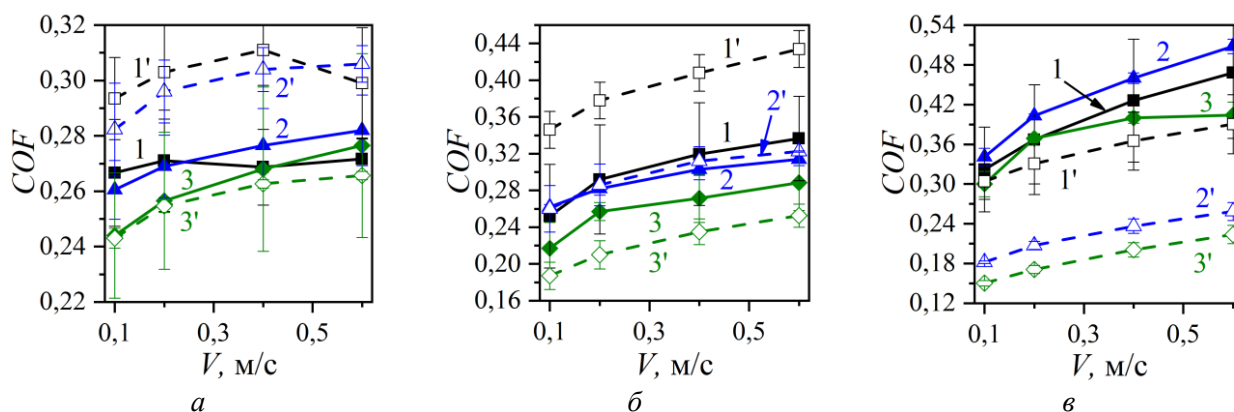


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения COF от скорости скольжения V при нагрузке 50 Н (1, 1'), 200 Н (2, 2') и 700 Н (3, 3') для образцов до (1, 2, 3) и после термического старения (1', 2', 3') при температуре испытаний: а – $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, в – $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

В первую очередь следует обратить внимание на увеличение диапазона изменения коэффициента трения с ростом температуры. При температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ он варьируется в пределах 0,1 (рис. 1, а), а при повышенной температуре ($+60\text{ }^{\circ}\text{C}$) – в пределах 0,4 (рис. 1, в). Повышение температуры приводит к комплексному изменению свойств материала. Уменьшается жесткость полимеров, растет поверхностная энергия. Поверхность не является идеально ровной (рис. 2), поэтому фактор несплошности контакта также влияет на фрикционное взаимодействие.

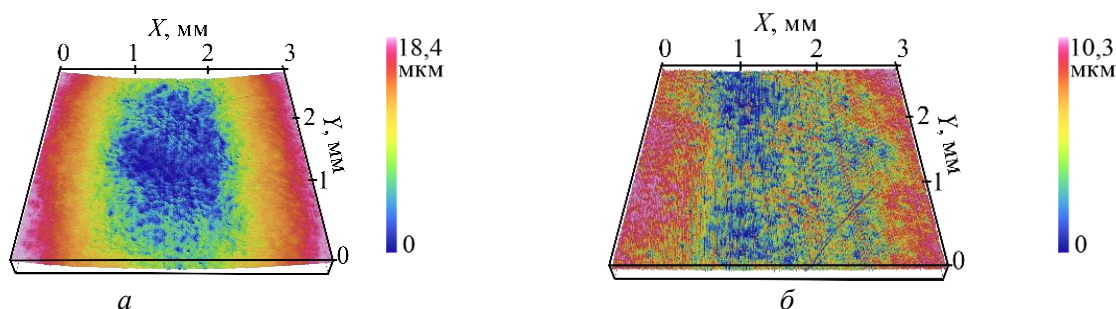


Рис. 2. Топография исходной поверхности образцов: а – до термического старения; б – после термического старения

Сочетание факторов дискретности контакта, обеспечивающей деформационную составляющую силы трения за счет реологических свойств резиновой подложки, и адгезии можно проанализировать исходя из результатов, приведенных на рис. 1, б. Разницу между кривыми 1 и 1', полученными для нагрузки 50 Н, можно объяснить тем обстоятельством, что дискретность контакта и, следовательно, деформационная составляющая силы трения выше для более жесткого полимерного композита (состаренный). Кривые 2 и 2' практически совпадают, вероятно, из-за того, что уменьшение поверхностной энер-

гии материала покрытия (и адгезионной составляющей силы трения) компенсирует увеличение деформационной составляющей. Разница между кривыми 3 и 3', полученными для максимальной нагрузки, демонстрирует преобладание адгезионной составляющей.

Средняя скорость изнашивания исходных образцов составила $1,3 \pm 0,1$ мкм/м, образцов после термического старения – $1,1 \pm 0,2$ мкм/м, то есть износ снизился на 15 %. Исходя из этого результатом термического старения является незначительное повышение износостойкости материала, что, по-видимому, связано с увеличением жесткости СВМПЭ [14].

Климатическое старение приводит к изменению деформационно-прочностных свойств СВМПЭ. После одного месяца выдержки происходит улучшение относительного удлинения на 20 % при незначительном снижении коэффициента сохранения модуля упругости, при выдержке в течение 3 месяцев относительное удлинение продолжает повышаться, однако снижается предел прочности, а после 6 месяцев СВМПЭ полностью теряет эластичность [6]. Влияние продолжительности климатического старения на коэффициент трения в зависимости от скорости скольжения и нагрузки было установлено экспериментально (рис. 3).

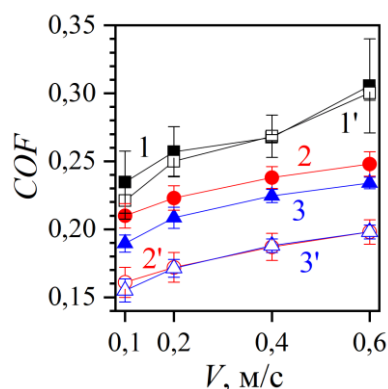


Рис. 3. Влияние времени экспонирования на зависимость коэффициента трения COF от скорости скольжения V при нагрузке 50 Н (1, 2, 3) и 700 Н (1', 2', 3'): 1, 1' – исходный; 2, 2' – 2 месяца, 3, 3' – 6 месяцев

Как видно, для исходного материала увеличение нагрузки не влияет на коэффициент трения. После старения материал становится чувствителен к нагрузке, а также зависит от продолжительности выдержки в случае слабонагруженного контакта. В условиях номинально конформного контакта шероховатость увеличивает эффективные адгезионные свойства поверхности [15], что, вероятнее всего, объясняет, почему кривые при меньшей нагрузке лежат выше, чем при большей. В целом коэффициент трения образцов после старения ниже из-за снижения поверхностной энергии и, соответственно, адгезионной составляющей силы трения. Влияние климатического старения сказывается также на рельефе поверхности образцов при трении (рис. 4). Износостойкость можно косвенно оценить, используя данные табл. 1, в которой приведены параметры типичной шероховатости поверхности образцов. С увеличением продолжительности старения разница между поверхностями до и после испытаний на трение уменьшается. У состаренных образцов начальная шероховатость больше, чем у исходных, а конечная шероховатость после испытаний меньше.

Таблица 1

Шероховатость до и после эксперимента в зависимости от продолжительности старения

Время экспонирования, месяцев	Параметр шероховатости Sq , мкм	
	до тестов	после тестов
0	0,38	1,11
2	0,53	0,92
6	0,54	0,62

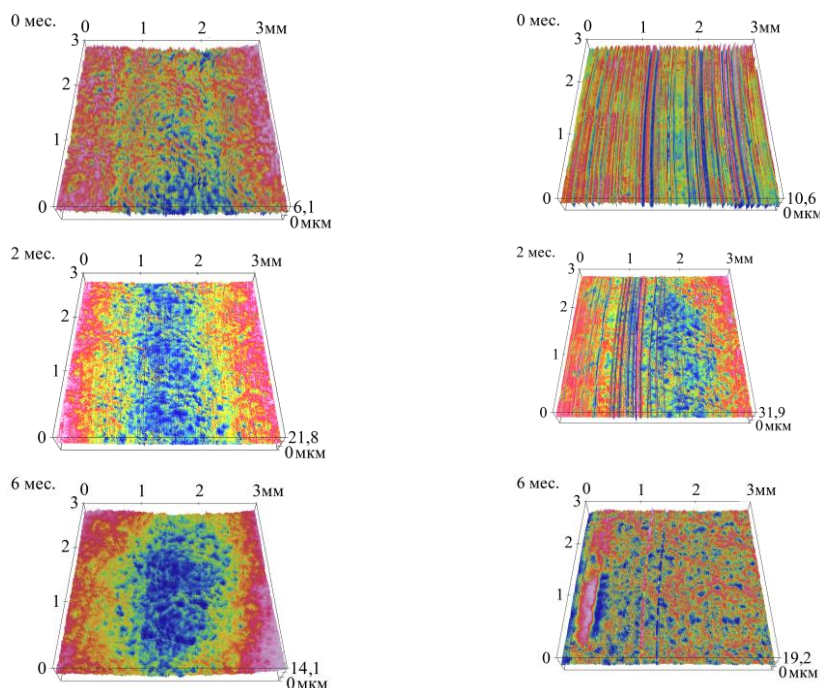


Рис. 4. Типичная топография поверхности образцов до испытаний (слева) и после цикла тестов (справа) в зависимости от продолжительности старения

На рис. 5 показано влияние температуры на коэффициент трения при климатическом старении композита в течение 6 месяцев. Также было проанализировано влияние климатического старения на износ (табл. 2).

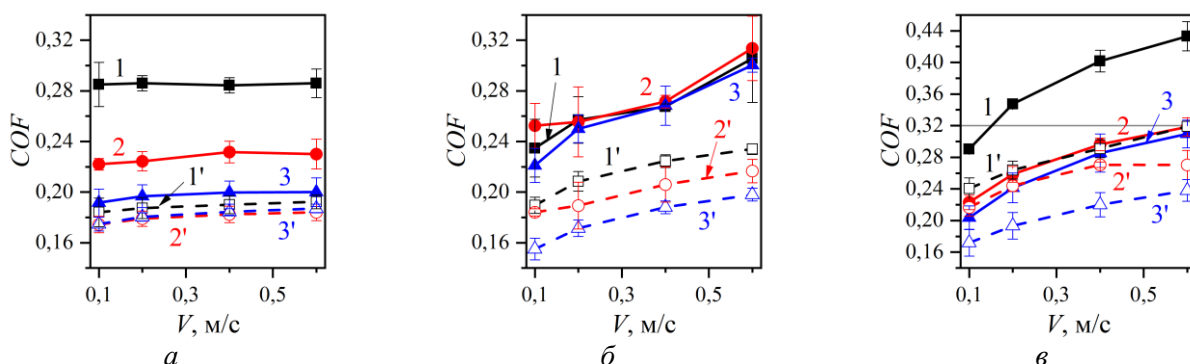


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения COF от скорости V для образцов до (1, 2, 3) и после климатического старения (1', 2', 3') при нагрузке 50 Н (1, 1'), 200 Н (2, 2') и 700 Н (3, 3') при температуре:
 $a - -20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $b - +23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v - +60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Износ в зависимости от выдержки при климатическом старении и температуры испытания

Выдержка при старении, месяцев	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Интенсивность изнашивания, мкм/м
0	+23	$1,5 \pm 0,5$
2	+23	$1,1 \pm 0,1$
6	+23	$1,1 \pm 0,3$
6	-20	$1,1 \pm 0,03$
6	+60	$1,6 \pm 0,4$

Несмотря на то что СВМПЭ, состаренный в течение 6 месяцев, разрушается при растяжении, образцы композита «резина – СВМПЭ» сохраняют свои свойства во фрикционном контакте при различных температурах. Как отмечалось выше, поверхностная энергия состаренных образцов ниже, что объясняет снижение коэффициента трения после старения за счет корреляции адгезионных сил с поверхностной энергией. При отрицательной температуре испытания зависимости коэффициента трения от скорости скольжения отличны от тех, что проявляются при комнатной и повышенной. СВМПЭ не проявляет реологические свойства, и зависимость коэффициента трения от скорости практически отсутствует.

Использование СВМПЭ в качестве покрытия на резине значительно повышает ее износостойкость (интенсивность изнашивания резины порядка 60 мкм/м [2]), а также существенно снижает коэффициент трения (коэффициент трения «резина – сталь» составляет 0,4–1,1 [16]). Можно отметить, что более длительная выдержка при климатическом старении ввиду увеличения жесткости полимера приводит к незначительному снижению скорости износа композита. Проведенные испытания на износ также показывают, что износ увеличивается при повышении температуры, а отрицательные температуры не оказывают на него влияния.

Выводы

Сочетание двух полимеров, резины и СВМПЭ позволяет получить демпфирующий материал с износостойким и антифрикционным слоем:

– коэффициент трения для композита в паре со стальным диском менее 0,4, что существенно меньше, чем у резины (0,4–1,1);

– интенсивность изнашивания для композита варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,6 мкм/м, что значительно ниже, чем у резины (60 мкм/м).

Трибологические испытания показали, что максимальный коэффициент трения, зафиксированный для состаренных образцов, на 15 % ниже, чем для исходных, что связано с уменьшением поверхностной энергии СВМПЭ при термическом старении. С повышением температуры испытаний уменьшается жесткость полимеров и растет поверхностная энергия, соответственно, растет коэффициент трения.

В результате климатического старения трибологические свойства композита «резина – СВМПЭ» (коэффициент трения и износостойкость) не теряются. Важно отметить, что менее значительная зависимость коэффициента трения от скорости для состаренного материала свидетельствует о потере его деформационных свойств, что может отрицательно сказаться на качестве уплотнений.

Список литературы

- 1 Optimizing the tribological performance of DLC-coated NBR rubber: The role of hydrogen in films / C. Bai, L. Qiang, B. Zhang [et al.] // Friction. – 2022. – Vol. 10. – P. 866–877. – DOI 10.1007/s40544-021-0498-0.
- 2 Повышение износостойкости морозостойких резин за счет армирования многостенными углеродными нанотрубками / А. В. Морозов, П. О. Буковский, Н. Н. Петрова, Е. Н. Тимофеева // Каучук и резина. – 2019. – Т. 78, № 6. – С. 256–363. – ISSN 0022-9466.
- 3 **Wypych, G.** Handbook of Polymers / G. Wypych. – Toronto : ChemTec Publishing, 2012. – 706 p. – ISBN 978-1-895198-47-8.
- 4 Two-Layer Rubber-Based Composite Material and UHMWPE with High Wear Resistance / A. A. Dyakonov, A. P. Vasilev, S. N. Danilova [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 13. – P. 4678. – DOI 10.3390/ma15134678.
- 5 **Chang, T.** Tribological behavior of aged UHMWPE under water-lubricated condition / T. Chang, C. Yuan, Z. Guo // Tribology International. – 2019. – Vol. 133. – P. 1–11. – DOI 10.1016/j.triboint.2018.12.038

References

- 1 Optimizing the tribological performance of DLC-coated NBR rubber: The role of hydrogen in films / C. Bai, L. Qiang, B. Zhang [et al.] // Friction. – 2022. – Vol. 10. – P. 866–877. – DOI 10.1007/s40544-021-0498-0.
- 2 Increase of wear resistance of frost-resistant rubbers due to reinforcement by multi-wall carbon nanotubes / A. V. Morozov, P. O. Bukovskii, N. N. Petrova, E. N. Timofeeva // Kauchuk i Rezina. – 2019. – Vol. 78, No. 6. – P. 256–363. – ISSN 0022-9466.
- 3 **Wypych, G.** Handbook of Polymers / G. Wypych. – Toronto : ChemTec Publishing, 2012. – 706 p. – ISBN 978-1-895198-47-8.
- 4 Two-Layer Rubber-Based Composite Material and UHMWPE with High Wear Resistance / A. A. Dyakonov, A. P. Vasilev, S. N. Danilova [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 13. – P. 4678. – DOI 10.3390/ma15134678.
- 5 **Chang, T.** Tribological behavior of aged UHMWPE under water-lubricated condition / T. Chang, C. Yuan, Z. Guo // Tribology International. – 2019. – Vol. 133. – P. 1–11. – DOI 10.1016/j.triboint.2018.12.038

- 6 **Колесова, Е. С.** Разработка полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата / Е. С. Колесова, О. В. Гоголева, П. Н. Петрова // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 122–131. – DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131.
- 7 Friction and wear characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites containing glass fibers and carbon fibers under dry and water-lubricated conditions / Y. Wang, Z. Yin, H. Li [et al.] // *Wear*. – 2017. – Vols. 380–381. – P. 42–51. – DOI 10.1016/j.wear.2017.03.006.
- 8 Fretting Wear Behavior of UHMWPE Under Different Temperature Conditions / Q. Wang, Y. Wang, H. Wang, Z. [et al.] // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. – 2017. – Vol. 56, No. 7. – P. 493–504. – DOI 10.1080/00222348.2017.1330131.
- 9 Using Thin Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Coatings to Reduce Friction in Frost-Resistant Rubbers / E. Torskaya, I. Shkalei, F. Stepanov [et al.] // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 20. – P. 2870. – DOI 10.3390/polym16202870.
- 10 **ГОСТ ISO 188-2013.** Резина и термоэластопласты. Испытания на ускоренное старение и теплоустойчивость. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 24 с.
- 11 **Крагельский, И. В.** Трение и износ : изд. 2-е перераб. и доп. / И. В. Крагельский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с.
- 12 **Хрущов, М. М.** Определение износа деталей машин методом искусственных баз / М. М. Хрущов, Е. С. Беркович. – Москва : Изд-во АН СССР, 1959. – 217 с.
- 13 **ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 50 с.
- 14 **Черезова, Е. Н.** Старение и стабилизация полимеров / Е. Н. Черезова, Н. А. Мукменева, В. П. Архиреев. – Казань : Изд-во Казанского нац. исслед. техн. ун-та, 2012. – 150 с. – ISBN 978-5-7882-1323-1.
- 15 **Kesari, H.** Effective macroscopic adhesive contact behavior induced by small surface roughness / H. Kesari, A. J. Lew // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2011. – Vol. 59, No. 12. – P. 2488–2510. – DOI 10.1016/j.jmps.2011.07.009.
- 16 Study on the Influence of Activated Carbon Nanotubes on the Tribological Properties of Frost-Resistant Rubber / P. O. Bukovskiy, A. V. Morozov,
- 6 **Kolesova, E. S.** Development of polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate / E. S. Kolesova, O. V. Gogoleva, P. N. Petrova // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. – 2021. – Vol. 26, No. 4. – P. 122–131. – DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131.
- 7 Friction and wear characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites containing glass fibers and carbon fibers under dry and water-lubricated conditions / Y. Wang, Z. Yin, H. Li [et al.] // *Wear*. – 2017. – Vols. 380–381. – P. 42–51. – DOI 10.1016/j.wear.2017.03.006.
- 8 Fretting Wear Behavior of UHMWPE Under Different Temperature Conditions / Q. Wang, Y. Wang, H. Wang, Z. [et al.] // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. – 2017. – Vol. 56, No. 7. – P. 493–504. – DOI 10.1080/00222348.2017.1330131.
- 9 Using Thin Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Coatings to Reduce Friction in Frost-Resistant Rubbers / E. Torskaya, I. Shkalei, F. Stepanov [et al.] // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 20. – P. 2870. – DOI 10.3390/polym16202870.
- 10 **GOST ISO 188-2013.** Vulcanized rubber and thermoplastics. Accelerated ageing and heat resistance tests. – Moscow : Standartinform, 2014. – 24 p.
- 11 **Kragelskii, I. V.** Friction and Wear : 2nd revised and enlarged edition / I. V. Kragel'skii. – Oxford : Mashinostroenie, 1965. – 362 p. – ISBN 978-0408200004.
- 12 **Khrushchov, M. M.** Determination of wear of machine parts by the artificial base method / M. M. Khrushchov, E. S. Berkovich. – Moscow : Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1959. – 217 p.
- 13 **GOST R ISO 25178-2-2014.** Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Area. Part 2. Terms, definitions and surface structure parameters. – Moscow : Standartinform, 2015. – 50 p.
- 14 **Cherezova, E. N.** Aging and stabilization of polymers / E. N. Cherezova, N. A. Mukmeneva, V. P. Arkhireev. – Kazan : Publishing house of Kazan National Research Technological University, 2012. – 150 p. – ISBN 978-5-7882-1323-1.
- 15 **Kesari, H.** Effective macroscopic adhesive contact behavior induced by small surface roughness / H. Kesari, A. J. Lew // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2011. – Vol. 59, No. 12. – P. 2488–2510. – DOI 10.1016/j.jmps.2011.07.009.
- 16 Study on the Influence of Activated Carbon Nanotubes on the Tribological Properties of Frost-

N. N. Petrova, E. V. Timofeeva // Mechanics of Solids. – 2019. – Vol. 54, No. 8. – P. 1250–1255. – DOI 10.3103/S0025654419080156.

Resistant Rubber / P. O. Bukovskiy, A. V. Morozov, N. N. Petrova, E. V. Timofeeva // Mechanics of Solids. – 2019. – Vol. 54, No. 8. – P. 1250–1255. – DOI 10.3103/S0025654419080156.

I. V. Shkalei

**THE EFFECT OF AGING ON TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS
OF A TWO-LAYER FROST-RESISTANT
RUBBER – ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE COMPOSITE**

Abstract. In the severe conditions of the Far North, the effect of polymers aging on their properties is important due to the long-term impact of various environmental factors leading to polymer degradation. In this work, friction and wear tests were carried out using a scheme simulating a sealing unit, a two-layer composite “rubber - ultra-high molecular weight polyethylene” under various loads, sliding speeds and temperatures. The effect of climatic and thermal aging on the frictional properties and wear resistance of the two-layer composite was estimated. It was found that the friction coefficient depends on the sliding speed, load and external temperature. Aging of the material leads to a decrease in the friction coefficient. The wear resistance of the material increases by 25 % in the second month of aging and does not change over the next four. With accelerated aging tests, wear decreases by 15 %. It can be concluded that the material can be used in friction units for a period limited to six months of climatic aging, and in friction units protected from solar radiation, it can be used without time restrictions.

Keywords: rubber, aging, nitrile-butadiene rubber, coating, ultra-high molecular weight polyethylene, polymer composite, friction, wear.

For citation: Shkalei, I. V. The effect of aging on tribotechnical characteristics of a two-layer frost-resistant rubber – ultra-high molecular weight polyethylene composite / I. V. Shkalei // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 231–238. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_231.

Сведения об авторах

Шкалей Иван Владимирович

Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),
лаборатория трибологии,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: ioann_shiva@list.ru

Information about the authors

Shkalei Ivan Vladimirovich

Ishlinsky Institute for Problems
in Mechanics RAS (IPMech RAS),
Laboratory of Tribology,
Postgraduate Student, Junior Researcher,
e-mail: ioann_shiva@list.ru