

А.В. Анисимов, И.В. Лишевич, А.С. Саргсян, И.В. Лобынцева, И.В. Блышко, Д.Д. Дворянцев, Е.А. Шарко
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: mail@crism.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГИБРИДНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Работа посвящена исследованию триботехнических характеристик и физико-механических свойств гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) марок ПЭСТ. Исследовано влияние состава полимерной матрицы и влияние активации поверхности волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) на физико-механические свойства и триботехнические характеристики ПКМ марки ПЭСТ. Показано, что модифицированные гибридные антифрикционные ПКМ, в том числе марки ПЭСТ-4 и ПЭСТ с активированными СВМПЭ волокнами, превосходят по характеристикам исходный материал.

Ключевые слова: ПКМ, гибридные антифрикционные ПКМ, сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), активация барьерным разрядом, коэффициент трения, прочность.

Введение

В предыдущих работах были разработаны и исследованы антифрикционные ПКМ на основе гибридных армирующих тканей различных составов [1,2]. Исследуемые гибридные антифрикционные ПКМ состояли из органических волокон, отвечающих в большей степени за функциональные свойства материала, такие как коэффициент трения, а также из неорганических волокон, которые обеспечивают механическую прочность и износостойкость материала.

Чередуя состав и соотношения армирующих волокон были изготовлены гибридные армирующие ткани на базе стеклянных, полиэтиленовых, полиамидных, арамидных, полиоксидазольных нитей марки «Арселон» и полиэфирных нитей. Из нескольких десятков опытных образцов ПКМ на основе вышеупомянутых тканей, были отобраны гибридные ПКМ на основе армирующей ткани из стеклянных и СВМПЭ волокон. Данному материалу была присвоено название ПЭСТ.

Материал марки ПЭСТ оптимально сочетает в себе необходимые прочностные свойства, обусловленные адгезионными характеристиками стеклянных волокон, и выдающиеся триботехнические характеристики, приобретенные за счет включения в состав волокон из СВМПЭ.

Однако, ввиду низкой адгезии СВМПЭ волокон к полимерной матрице, актуальной задачей остается модернизация разработанного материала ПЭСТ. В данной работе приведены результаты повышения прочности материала ПЭСТ за счет активации поверхности волокон СВМПЭ и повышения триботехнических характеристик за счет применения новой полимерной матрицы.

Материалы и методы исследования

Особенности, свойства и характеристики исходного материала ПЭСТ были подробно освещены в предыдущих работах и сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристики антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ.

Характеристики	Показатели
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	215
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	352
Модуль упругости при сжатии при 20-60 Мпа, ГПа	3,8
Макс. Деформация при сжатии, %	4,90
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	25,40
Коэффициент трения по стали 20Х13 и конт. давл. 30 МПа	0,07
Интенсивность изнашивания по стали 20Х13 и конт. давл. 30 МПа, мкм/км	5

Среди известных методов активации СВМПЭ волокон был выбран высокотехнологичный способ воздействия барьерного разряда.

В исследовании применялись разработанные химически модифицированные эпоксидные связующие. Связующее ЭТ-2 является эталоном сравнения и применяется при изготовлении антифрикционного материала марки УГЭТ; ЭТ-3 - модифицированное связующее с аминным отвердителем, являющимся одноупаковочным комплексом каталитического действия с ускорителем; ЭТ-4 – связующее, пластифицированное активным разбавителем и низкомолекулярным полиамидо-полиаминным отвердителем.

Роль модификаторов – повышение эксплуатационных свойств антифрикционных ПКМ в части физико-механических и триботехнических свойств. За счет увеличения длины связей снижается взаимодействие полярных групп, что приводит к сегментальной подвижности цепных молекул. В результате этого сшитый полимер и композит на его основе приобретает повышенную пластичность, устойчивость к ударам, вибрациям и длительным нагрузкам, и как следствие, при трении увеличивается эффективная площадь контакта с контртелом, в результате чего снижается интенсивность изнашивания материала. [3]

Для того, чтобы оценить влияние активации поверхности волокон из СВМПЭ и влияние замены полимерной матрицы были проведены лабораторные разрушающие и триботехнические испытания.

Физико-механические свойства образцов ПКМ определялись на испытательной машине Shimadzu AG-50kNX в соответствии со следующими нормативными документами:

- Разрушающее напряжение при сжатии по ГОСТ 23803-79;
- Изгибающее напряжение при разрушении по ГОСТ 4648-2014;
- Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге ГОСТ 23804-79.

Триботехнические испытания проводились на серийной машине трения модели ИИ 5018 производства завода «Точприбор» по методике экспрессных комплексных испытаний, разработанной в ИПМ РАН (лаборатория д. ф-м. н. проф. Б. М. Гинзбурга) [5].

Для исследования микроструктуры образцов гибридных ПКМ и оценки износа после триботехнических испытаний использовался измерительно-вычислительный комплекс на базе стереоскопического микроскопа МБС-10.

Для экспериментального подтверждения работоспособности модифицированного гибридного ПКМ марки ПЭСТ-4 были проведены стендовые испытания подшипников скольжения на территории предприятия ЗАО

«Центральный научно-исследовательский институт Судового машиностроения» на стенде, имитирующем условия эксплуатации узлов трения судовых механизмов.

Обсуждение результатов

Результаты исследования физико-механических свойств модифицированных гибридных ПКМ марок ПЭСТ.

Для изготовления модифицированных образцов ПЭСТ применялись полимерные матрицы ЭТ-3 и ЭТ-4, а также гибридная армирующая ткань, прошедшая активацию СВМПЭ волокон. Изготовление контрольных плит из ПКМ осуществлялось методом горячего прессования в закрытой пресс-форме.

Были получены следующие образцы модифицированного ПЭСТ:

- ПЭСТ на основе модифицированного связующего ЭТ-3 (ПЭСТ-3);
- ПЭСТ на основе модифицированного связующего ЭТ-4 (ПЭСТ-4);
- ПЭСТ на основе модифицированного связующего ЭТ-3 и гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон (ПЭСТ-3 актив);
- ПЭСТ на основе модифицированного связующего ЭТ-4 и гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон (ПЭСТ-4 актив).

Для исследования физико-механических свойств образцов модифицированных ПКМ марки ПЭСТ были проведены испытания по определению разрушающего напряжения при сжатии, межслойном сдвиге и изгибающего напряжения при разрушении. Результаты лабораторных испытаний образцов гибридных ПКМ представлены в виде графиков на рисунке 1 и в таблице 2.

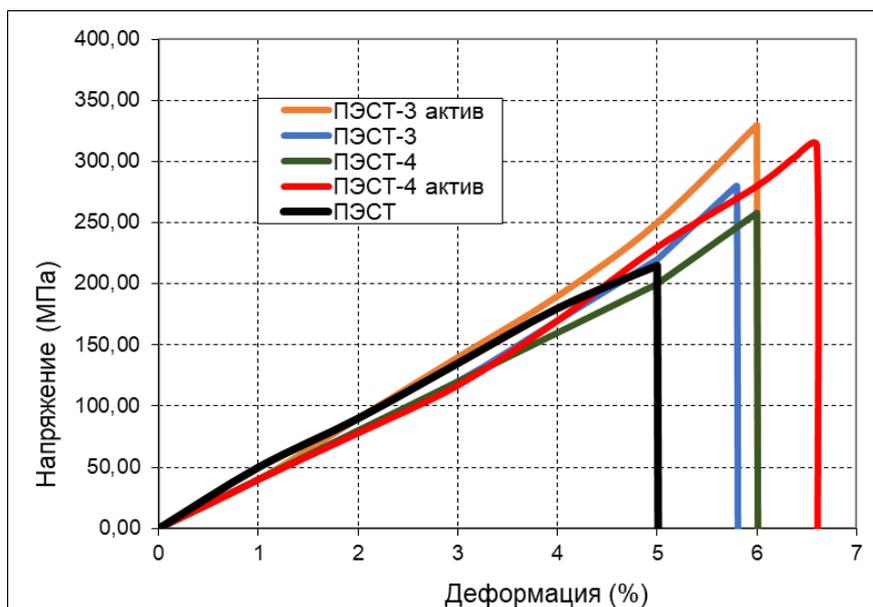


Рисунок 1 – график механических испытаний на сжатие.

Таблица 2 - Результаты физико-механических испытаний модифицированного ПЭСТ.

Характеристики	Исходный ПЭСТ на основе связующего ЭТ-2	ПЭСТ-3	ПЭСТ-4	ПЭСТ-3 актив	ПЭСТ-4 актив
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	215,0	280,0	260,0	329,0	315,0
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	352,0	507,0	500,0	573,0	595,0
Модуль упругости при сжатии при 20-60 Мпа, ГПа	3,8	4,0	3,6	3,7	4,0
Макс. Деформация при сжатии, %	4,9	5,8	6,0	7,2	6,6

Характеристики	Исходный ПЭСТ на основе связующего ЭТ-2	ПЭСТ-3	ПЭСТ-4	ПЭСТ-3 актив	ПЭСТ-4 актив
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	25,4	28,0	28,5	37,2	34,13

Анализируя результаты разрушающих испытаний можно сделать однозначный вывод, что применение модифицированных полимерных матриц ЭТ-3 и ЭТ-4 привело к повышению прочности при сжатии на 30% и 20% соответственно. На 40% повысился показатель максимального напряжения при изгибе и на 10% увеличилась прочность при межслойном сдвиге.

По результатам испытаний ПЭСТ-3 и ПЭСТ-4 на основе гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон, также видно преимущество прочностных характеристик по сравнению с исходным ПЭСТ. После активации прочность при сжатии у ПЭСТ-3 выросла на 53%, а у ПЭСТ-4 на 46%. Повысились также показатели межслойного сдвига и прочности при изгибе.

Результаты триботехнических исследований

В процессе триботехнических испытаний определяются следующие характеристики: линейная интенсивность изнашивания и коэффициент трения ПКМ.

Триботехнические испытания образцов проводились в ванне со смазкой из проточной пресной воды. Контртело выполнено в виде ролика диаметром 50 мм из стали 20Х13 в состоянии поставки. Скорость вращения контртела составляет 400 об./мин, что соответствует линейной скорости скольжения 1м/с. Максимальная нагрузка на образец ПКМ во время испытания составила - 1800Н.

Результаты триботехнических испытаний изображены в виде диаграмм на рисунке 2.

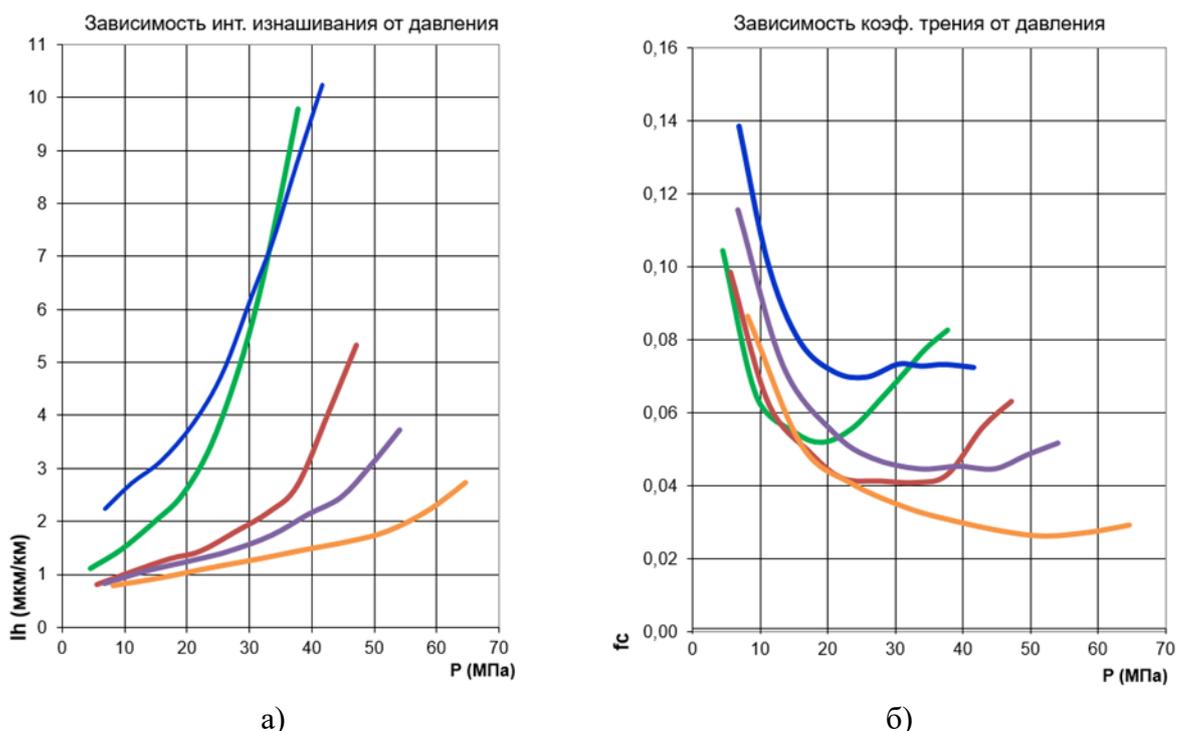


Рисунок 2 – Диаграммы триботехнических характеристик, модифицированных ПКМ марок ПЭСТ: а) график зависимости интенсивности изнашивания от давления; б) график зависимости коэффициента трения от давления.

Анализируя результаты исследования трибосвойств модифицированных гибридных ПКМ марок ПЭСТ в паре с контртелом из стали 20Х13, можно наблюдать, что применение модифицированной полимерной матрицы ЭТ-4 на 40% снижает коэффициент трения при контактном давлении 30 МПа и в 5 раз увеличивает стойкость ПЭСТ-4 к изнашиванию при той же нагрузке. Применение матрицы ЭТ-3 негативно влияет на трибосвойства материала ПЭСТ-3, увеличивая коэффициент трения и интенсивность изнашивания материала.

При использовании в качестве армирующего материала гибридной ткани, которая прошла процесс активации поверхности СВМПЭ волокон, наблюдается тенденция к повышению трибосвойств материалов ПЭСТ-3 и ПЭСТ-4.

Результаты стендовых испытаний подшипников скольжения

Целью испытаний являлось экспериментальное подтверждение работоспособности материала ПЭСТ-4 для возможности применения его в парах трения подшипников скольжения при работе в различных эксплуатационных условиях, характерных для узлов трения судовых механизмов.

Для проведения испытаний из материала ПЭСТ-4 были изготовлены подшипники скольжения в виде втулки с внутренним диаметром 60 мм, внешним диаметром 90 мм и длиной 60 мм, для подачи водяной смазки во втулках предусмотрена канавка с отверстием. Внешний вид втулки до и после стендовых испытаний представлен на рисунке 3.

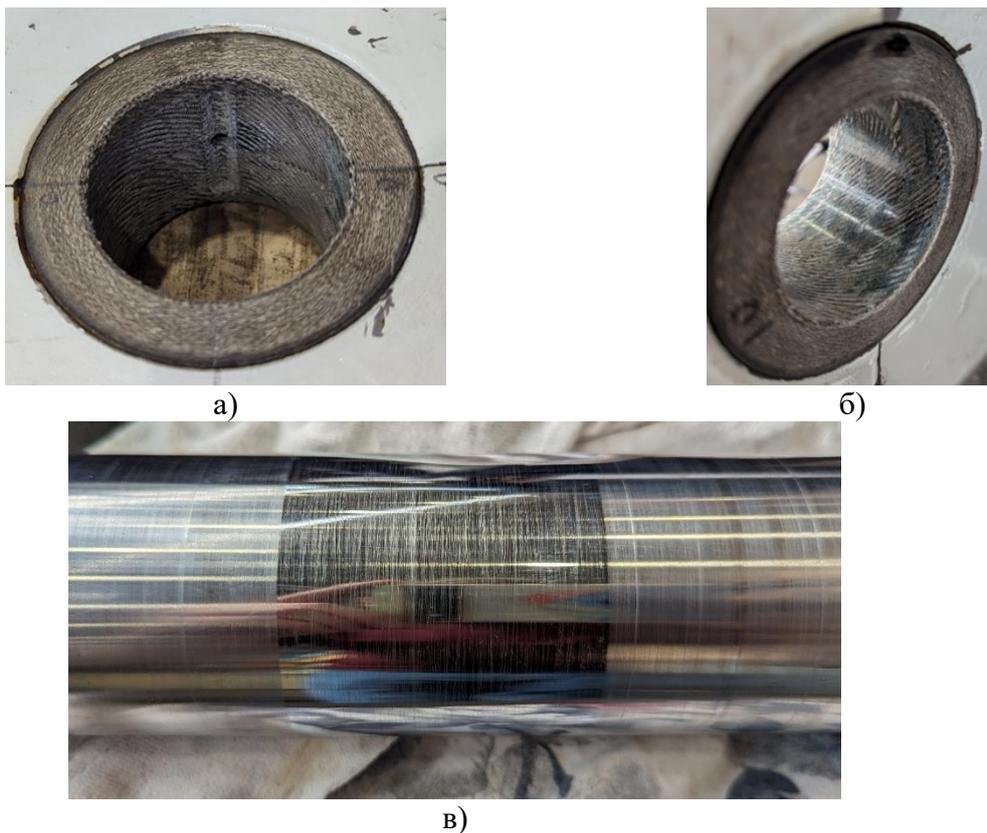


Рисунок 3 - Внешний вид пары трения после испытаний: а) Втулка из материала ПЭСТ-4 до испытаний; б) Втулка из материала ПЭСТ-4 после испытаний; в) Хромированный вал после испытаний.

Материалом контртела была выбрана сталь с хромированным покрытием.

В ходе испытаний применялась смазка пресной водой.

При контактном давлении 12 МПа, скорости вращения вала 0,5 м/с и продолжительности испытаний 50 часов, износ исследуемой втулки составил

3мкм/км, что полностью удовлетворяет требованию необходимого ресурса узла трения с заданными параметрами. Внешний вид хромированного вала после испытаний представлен на рисунке 3.

Заключение

1. В ходе работы, путем модификации ранее разработанного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ на основе гибридной армирующей ткани, созданы ПЭСТ-3, ПЭСТ-4, ПЭСТ-3 актив и ПЭСТ-4 актив для подшипников скольжения, которые выдерживают высокие контактные давления.

2. Модификация материала ПЭСТ была достигнута за счет замены полимерной матрицы, а также за счет проведения процесса активации поверхности волокон СВМПЭ.

3. Экспериментально установлены закономерности влияния замены полимерной матрицы и влияние активации поверхности волокон из СВМПЭ на комплекс триботехнических, физико-механических и эксплуатационных свойств гибридных ПКМ марок ПЭСТ.

4. Применение модифицированных полимерных матриц ЭТ-3 и ЭТ-4 привело к повышению прочности при сжатии на 30% и 20% соответственно. На 40% повысился показатель максимального напряжения при изгибе и на 10% увеличилась прочность при межслойном сдвиге.

5. Применение гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон, для модификации ПЭСТ-3 и ПЭСТ-4 еще на ~ 10 % повысило их показатели прочности.

6. По результатам триботехнических испытаний установлено, что коэффициент трения и величина линейного износа ПЭСТ-4 при контактном давлении 30 МПа имеет более низкую интенсивность изнашивания ($I_h = 1,3$ мкм/км) и коэффициент трения ($f_c = 0,04$) в сравнении с исходным ПЭСТ ($I_h = 5,5$ мкм/км, $f_c = 0,07$).

7. На основании проведенных стендовых испытаний подшипников скольжения в ЗАО «ЦНИИ СМ» сделано заключение, что триботехнические характеристики материала ПЭСТ-4 (за время испытаний 50 часов), удовлетворяют критериям энер-гоэффективности и эксплуатационной надежности. Опытные малогабаритные образцы подшипников скольжения из разработанного антифрикционного ПКМ рекомендованы для проведения ресурсных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Анисимов д.т.н., И. В. Лишевич к. т. н., А. С. Саргсян к. т. н., И. В. Лобынцева, И. В. Блышко, М. Ю. Соболев, Д. Д. Дворянцев, Е. А. Шарко. «Разработка и исследование нового гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала с диэлек-трическими свойствами» // Вопросы материаловедения..

2. Е. А. Шарко, И. В. Блышко, Д. Д. Дворянцев, М. Ю. Соболев, А. С. Саргсян к. т. н., И. В. Лишевич, к. т. н., А.В. Анисимов д.т.н. «Исследование физико-механических и триботех-нических характеристик гибридных антифрикционных полимерных композиционных мате-риалов» // сборник статей Международной научно-практической конференции «BALT TRIBO 2024» в СПбПУ, УДК 620.178:621.89, с.25-31;

3. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Савелов А. С., Шарко Е. А. «Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной терморезактивной матрицы» // Вопросы материаловедения, 2024 № 2 (118) DOI: 10.22349/1994-6716-2024-118-2-00-00

4. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2014. – С. 79-133.

5. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы : учеб. пособие / В. Г. Бондалетов; Томский политехн. ун-т; Л. И. Бондалетова .— Томск : Изд-во ТПУ, 2013. — 111с.

6. Точильников Д.Г. Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров. // Вопросы материаловедения.-2002-№ 3(31). – С. 39-48.

7. Машков Ю.К., Трибология конструкционных материалов: Учеб.пособие. – Омск: ОмГТУ, 1996. – 304 с.

8. Материалы для судостроения и морской техники: Справ. / Под ред. И.В. Горынина. СПб: НПО «Профессионал» 2009. Т. 2. С.381-433.

9. Анисимов А.В., Барахтин Б.К., Бахарева В.Е., Петров С.Н., Рыбин В.В. Исследование микроструктуры и механизма изнашивания поверхностей пар трения углепластики - медь-содержащие сплавы // Вопросы материаловедения -2006 - №2(46) – с. 44-51.

10. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения – 2011 - №1(65) – с.75-88.

A.V. Anisimov, I.V. Lishevich, A.S. Sargsyan, I.V. Lobyntseva, I.V. Blyshko,
D.D. Dvoryancev, E.A. Sharko.
National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural
Materials “Prometey”, Saint Petersburg, Russia, E-mail: mail@crism.ru

STUDY OF TRIBOTECHNICAL AND PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED HYBRID ANTIFRICTION POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Abstract

The work is devoted to the study of tribotechnical characteristics and physico-mechanical properties of hybrid antifriction polymer composite materials (PCM) of PEST grades. The influence of the polymer matrix composition and the influence of the surface activation of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers on the physical and mechanical properties and tribological characteristics of PEST grade polymer composite materials were studied. It was shown that modified hybrid antifriction polymer composite materials, including PEST-4 and PEST grades with activated UHMWPE fibers, surpass the characteristics of the original material.

Keywords: polymer composite materials, hybrid antifriction polymer composite materials, ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), barrier discharge activation, friction coefficient, strength.