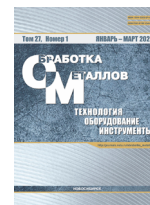




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование поведения в условиях изнашивания полифениленсульфидных (PPS) композиционных материалов, армированных стекловолокном и органической глиной

Вишавджит Бханавасе^a, Бхагван Джоги^{b, *}, Йогирадж Дама^c

Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере, Райгад, Махараштра, 402103, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-2268-2693>, vlbhanavase@sinhgad.edu; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2099-7533>, bfjogi@dbatu.ac.in;
^c <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>, yogirajdama@dbatu.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678.8

История статьи:

Поступила: 10 января 2025
 Рецензирование: 23 января 2025
 Принята к печати: 03 февраля 2025
 Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Полифениленсульфид (PPS)
 Стекловолокно
 Бентонитовая глина
 Трение и износ
 Трибологические испытания по схеме «стержень – диск»
 Метод Тагучи
 Износостойкость

АННОТАЦИЯ

Введение. В данном исследовании изучается влияние ключевых рабочих параметров (нагрузки, скорости скольжения и пути скольжения) на поведение в условиях изнашивания композиционных материалов, изготовленных из 40 % стекловолокна и полифениленсульфида (PPS) с различным процентным содержанием бентонитовой глины по весу. Основная цель работы заключалась в оценке того, как различные экспериментальные условия влияют на характеристики изнашивания. Для достижения этой цели проводили эксперименты с использованием ортогональной матрицы L9 в соответствии с методом Тагучи при трех уровнях сложности. Трибологические испытания выполняли на установке, которая реализует схему трения «стержень – диск» в соответствии со стандартами ASTM G99 с шестью образцами материалов, содержащими различные процентные доли бентонитовой глины. Результаты показывают, что износ исходного образца увеличивается с ростом приложенной средней нагрузки. В отличие от этого образцы, содержащие бентонитовую глину, демонстрируют уменьшение износа с увеличением средней нагрузки. Кроме того, увеличение содержания бентонитовой глины приводит к значительному уменьшению износа, но дальнейшее увеличение до 7 % глины приводит к заметному увеличению износа. **Методы исследования.** В этом исследовании изучено влияние нагрузки, скорости скольжения и весовой доли бентонитовой глины на износ и коэффициент трения (COF) композиционного материала. Композиционные образцы с различным содержанием глины были испытаны с использованием установки, реализующей схему трения «стержень – диск», а износ и коэффициент трения измерялись как зависимые параметры. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) использовалась для анализа поверхностей износа после испытаний, чтобы определить влияние независимых параметров на механизмы изнашивания и морфологию поверхности. Результаты выявили важные направления в характере трения и изнашивания при различных условиях. Сравнительный анализ дал представление об оптимизации трибологических характеристик материала путем балансировки нагрузки, скорости и содержания глины. **Результаты и обсуждение.** В данном исследовании изучено влияние добавления бентонитовой глины на износостойкость композитов PPS + GF (полифениленсульфид + стекловолокно). Полученные данные показывают, что износ снижается до 3 % при первоначальном увеличении процентного содержания бентонитовой глины по весу, но вновь возрастает при дальнейшем увеличении содержания глины. Отмечено, что более высокое процентное содержание бентонитовой глины по весу приводит к увеличению удельной скорости изнашивания и снижению коэффициента трения из-за проявления абразивного механизма изнашивания, вызванного агломерацией глины. Наоборот, более низкое процентное содержание бентонитовой глины по весу способствует снижению скорости изнашивания, увеличивая при этом коэффициент трения. Эта работа направлена на решение двойной задачи: оптимизации характеристик и снижения себестоимости материалов, используемых в условиях трения и износа. **Обоснование актуальности исследования.** Цель этого исследования – разработать органический полимерный композиционный материал, обладающий улучшенными характеристиками и конкурентоспособный с точки зрения затрат и прибыли. Одной из ключевых задач является создание такого композиционного материала с использованием бентонитовой глины – органической и легкодоступного материала, который можно приобрести по низкой цене. Это позволит производить композит по конкурентоспособной цене без ущерба для качества. Другой целью исследования является замена существующих фрикционных материалов в тормозных системах и муфтах новым разработанным композитом, что потенциально улучшит их характеристики и долговечность. Помимо этого, работа направлена на создание композиционного материала, пригодного для использования в подшипниках скольжения, особенно работающих в агрессивных средах. Такой композит должен обладать повышенной устойчивостью к химическому разрушению, обеспечивая увеличенный срок службы и надежность в тяжелых условиях эксплуатации.

Для цитирования: Бханавасе В., Джоги Б.Ф., Дама Й.Б. Исследование поведения в условиях изнашивания полифениленсульфидных (PPS) композиционных материалов, армированных стекловолокном и органической глиной // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 203–217. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217.

Аббревиатуры

PPS – полифениленсульфид;
 GF – стекловолокно;
 COF – коэффициент трения;

*Адрес для переписки

Джоги Бхагван Фатру, профессор
 Технологический университет доктора Бабасахеба Амбедкара,
 Лонере, Райгад,
 402103, Махараштра, Индия
 Тел.: +91 942-116-6370, e-mail: bfjogi@dbatu.ac.in

SEM – сканирующая электронная микроскопия;
 FRP – волокно-армированный полимер;
 MMT – монтмориллонит;
 POM – полиоксиметилен;
 PTFE – политетрафторэтилен;
 EDS – энергодисперсионная спектроскопия;
 HRC – твердость по Роквеллу, шкала С;
 OMMT – органически модифицированный монтмориллонит;
 SAXS – малоугловое рассеяние рентгеновских лучей.

Введение

Проблема загрязнения, связанного с выбросами частиц износа керамических, полуметаллических и металлических рабочих поверхностей тормозных механизмов, стимулировала исследования по их замене на альтернативные материалы на основе натуральных волокон, таких как лен, конопля и сизаль. Эти органические волокна отличаются экономичностью, биоразлагаемостью и малым весом. В то же время синтетические волокно-армированные полимерные композиты (FRP) находят широкое применение в различных инженерных областях, включая аэрокосмическую, автомобильную и строительную промышленность, благодаря своим высоким удельным характеристикам (модулю упругости и прочности), биоразлагаемости (в отдельных случаях), коррозионной стойкости и длительному сроку службы.

Ключевую роль в определении свойств FRP-композитов играет межфазная граница волокно-матрица, через которую происходит передача напряжений сдвига от матрицы к армирующему волокну, влияя как на кратковременные, так и на долговременные характеристики материала. В данной работе представлен обзор структуры и свойств межфазной границы волокно-матрица [1–3]. Показано, что характеристики межфазной границы между армирующим волокном и полимерной матрицей оказывают значительное влияние на механические и трибологические свойства композита.

На примере композита GFF/PPS (стекловолокно/полифениленсульфид) продемонстрировано, что оптимальный состав, содержащий 80 масс. % GFF (~70 об. %), обеспечивает наилучшие механические свойства и смачиваемость. Высокие механические характеристики PPS-композитов с ультравысоким содержанием стекловолокна обусловлены увеличенной толщиной межфазного слоя и эффектом взаимозацепления волокон.

В контексте экологичности использование биоразлагаемых армирующих волокон, таких как глина, может вызывать вопросы применительно к композитам на основе углеродного волокна / глины / РОМ (полиоксиметилен). Эксперименты, направленные на изучение механических и трибологических свойств таких композитов,

показали, что добавление глины способствует увеличению модуля упругости при растяжении и прочности. Установлено, что введение углеродного волокна в РОМ-композиты улучшает их механические свойства и износостойкость. Композит на основе углеродного волокна, глины и РОМ продемонстрировал минимальные значения удельной скорости изнашивания и коэффициента трения. Полимерные композиты, модифицированные наноглиной, характеризуются повышенными механическими свойствами, такими как прочность на растяжение, предел текучести, модуль упругости, вязкость разрушения и усталостная прочность, по сравнению с немодифицированными полимерами. Тем не менее данные об износостойкости и поверхностных механических свойствах таких материалов (твердость и устойчивость к царапинам) остаются ограниченными. Показано, что оптимизация содержания (масс. %) наноглины способствует улучшению межфазного взаимодействия между волокном, полимерной матрицей и наноглиной, что открывает перспективы для повышения эффективности применения нанокompозитов в конструктивных элементах [4–6].

Для оценки трибологических характеристик композиционных материалов были определены скорость изнашивания и коэффициент трения. Экспериментальные исследования показали, что полимерные композиты, содержащие углеродные волокна, графит, политетрафторэтилен в полифениленсульфидной матрице, демонстрируют хорошие показатели износостойкости в рабочих условиях. Отмечено, что обработка поверхности монтмориллонитовой (ММТ) глины приводит к улучшению ее адгезии и взаимодействия с армирующими компонентами, что положительно сказывается на прочностных характеристиках композитов (на растяжение и изгиб) и дополняет функциональность, обеспечиваемую натуральными волокнами. Модификация поверхности придает гидрофильной ММТ гидрофобные свойства, повышая ее совместимость с органической полимерной матрицей.

Следует отметить, что межфазное взаимодействие между матрицей и армирующими волокнами глины оказывает существенное влияние на процесс формирования локальных деформаций (что было подтверждено методом цифровой корреляции изображений), а также на процессы за-

рождения и распространения повреждений в образцах из углеродного волокна, армированного полифениленсульфидом (PHS), при испытаниях на растяжение под углами $\pm 45^\circ$ и 0° . Межфазная адгезия оказывает существенное влияние на характер разрушения: образцы с прочной межфазной связью демонстрируют когезионный тип разрушения, в то время как образцы со слабой межфазной связью характеризуются интенсивным расслоением [7–9].

Помимо границы раздела, на трибологические характеристики влияет частота движения: коэффициент трения снижается с ее увеличением. Напротив, увеличение пройденного пути скольжения приводит к увеличению коэффициента трения. Типичная нагрузка не оказывает существенного влияния на изнашивание. Зависимость износа от пройденного расстояния имеет сложный характер: сначала он уменьшается, а затем увеличивается. Таким образом, коэффициент трения и интенсивность износа зависят от нагрузки и частоты возвратно-поступательного движения. Сетчатая структура диспергированных силикатных слоев в нанокompозитах, а следовательно, и вязкостные свойства нанокompозитов в значительной степени определяются концентрацией введенных волокон OMMT [10–12]. В данной работе представлен новый метод малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (SAXS) для анализа степени дисперсии силикатных слоев в полимерной матрице. Результаты SAXS и STEM показали, что содержание OMMT в количестве 5 % по массе является пороговым, инициирующим формирование прочной флокулированной структуры диспергированных силикатных слоев. Дальнейшее увеличение концентрации OMMT существенно изменяет вязкостные свойства нанокompозита, содержащего OMMT в количестве 5 % по массе [13].

Композитное покрытие из армированного углеродным волокном PPS, нанесенное на нержавеющую сталь и работающее в условиях водяной смазки, демонстрирует значительно более высокую износостойкость, чем при сухом трении [14–15]. Трибологическое поведение композиционного покрытия в условиях водяной смазки зависит как от скорости скольжения, так и от нагрузки. При низкой скорости (0,43 м/с) наблюдается устойчивый рост трения, который с увеличением нагрузки сменяется его постепенным

снижением. Влияние скорости скольжения на скорость износа композиционного покрытия менее выражено, чем влияние нагрузки на коэффициент трения, который быстро возрастает под давлением. Коэффициент трения постепенно увеличивается с ростом нагрузки; при высоких скоростях (0,86 м/с) этот эффект усиливается [16–18].

Исследование влияния сухой и водяной смазки на трибологические характеристики покрытий из полифениленсульфида, армированного углеродным волокном, показывает, что колебания коэффициента трения во времени более стабильны при использовании водяной смазки, чем при сухом трении. Композитное покрытие, работающее в условиях водяной смазки, демонстрирует более высокую износостойкость, чем в условиях сухого трения. В исследованиях [19–20] представлены данные, посвященные изучению трибологических и механических свойств композиционного материала, состоящего из 70 % полиамида-66 (PA66) и 30 % полифениленсульфида (PPS), модифицированного различным содержанием политетрафторэтилена (PTFE).

Авторы выражают искреннюю благодарность кафедре машиностроения Технологического университета им. доктора Бабасахеба Амбедкара, Лонере; компании D. N. Polymers, Чинчвад; Институту информационных технологий Вишвакарма, Кондхва, Пуна; DUTECH India Laboratories, Пуна; Научно-исследовательскому институту Агаркара, Пуна, за поддержку и неоценимый вклад в данную работу. Авторы также признательны перечисленным организациям за вклад в проведение исследования.

Экспериментальная часть

Анализ показал, что добавление PTFE в смесь PA66/PPS негативно влияет на свойства последней, однако существенно снижает коэффициент трения и повышает износостойкость. Композит на основе PPS с 40 % стекловолокна и добавками бентонитовой глины различной концентрации, полученный методом термокомпрессии, является в определенной степени экологически чистым. В рамках данного исследования изучалось влияние нагрузки, скорости скольжения и состава на трибологические характеристики PPS, армированного 40 % стекловолокна и содержащего различные концентрации глины. Результаты показывают, что увеличение содержания глини-

стых частиц и их равномерное распределение в матрице PPS способствует накоплению продуктов износа. Эти продукты образуются в результате адгезионного износа на границе контакта между поверхностью композита и неровностями (выступами) на стальном диске, играющими роль абразивных частиц. Трибологическое поведение этих продуктов износа определяется относительной высотой выступов на поверхности стального контртела. Было установлено, что минимальный коэффициент трения соответствует композиту, не содержащему глины. Введение 2 % глины приводит к росту коэффициента трения, тогда как дальнейшее увеличение до 5 % вызывает снижение коэффициента трения. Подробная информация о составе исследованных материалов представлена в табл. 1.

Бентонитовая глина (алюмосиликат) – это распространенный компонент, используемый в сочетании с PPS и 40 % стекловолокна для создания экологически безопасного PPS-композита. Испытания на изнашивание проводили на машине трения DUCOM TR-20-M26 по схеме «стержень – диск», обеспечивающей непрерывный контакт между образцом (стержнем) и вращающимся диском. В экспериментах использовали цилиндрический стержень высотой 40 мм и диаметром 10 мм, контактирующий с плоской

поверхностью стального диска диаметром 300 мм и толщиной 12 мм. Материалом для изготовления дисков служила сталь марки 41MoCr11 с твердостью в диапазоне 55...58 HRC. Стальные стержни были изготовлены из композиционного материала с тщательно подобранным составом. Перед каждым испытанием поверхность стержня и диска очищали. Каждое испытание повторяли пять раз с использованием новых стержней и дисков при сохранении неизменных параметров. Испытания проводили в условиях сухого трения для поддержания постоянной температуры на протяжении расстояния скольжения 33 085,26 м. В экспериментах использовали три скорости скольжения: 2,0423 м/с, 4,0846 м/с и 6,1269 м/с, а также три уровня контактной нагрузки между стержнем и диском. Значения параметров испытаний для каждого уровня представлены в табл. 2. Экспериментальный план был разработан в соответствии с ортогональной матрицей L9 по методу Тагучи, что предполагало проведение девяти испытаний для каждого состава материала.

Целью данного исследования являлось определение скорости изнашивания и коэффициента трения шести различных композитов на основе PPS с 40 % стекловолокна и разным содержанием глины. Материалы были предоставлены

Таблица 1

Table 1

Материалы и методика
Materials and Method

№ п/п	Образец	PPS, вес. %	GF, вес. %	Глина, вес. %
1	PGB0	62	30	0
2	PGB1	60	30	2
3	PGB2	55	30	5
4	PGB3	50	30	9

Таблица 2

Table 2

Параметры испытаний
Test parameters

Скорость скольжения v , м/с $\pm 5\%$	Давление p , Н/мм ² $\pm 5\%$	Нагрузка N , Н $\pm 5\%$	Время, мин
2,045	0,27	30	20
4,085	0,52	50	50
6,127	0,78	70	80

компанией D. N. Polymers (Чинчвад, Пуна). До и после испытаний образцы (стержни и диски) взвешивались на прецизионных аналитических весах. Морфологические исследования поверхности износа проводили методом сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Результаты и их обсуждение

Исследование процесса изнашивания PGB0 в зависимости от нагрузки

Данное исследование посвящено изучению влияния средней нагрузки на износ композита PPS + 40 % GF (стекловолокно) при постоянной скорости скольжения. Для анализа трех рабо-

чих параметров на трех уровнях была применена схема Тагучи L9, подробно представленная в табл. 3. Такой подход направлен на систематическое исследование влияния нагрузки на износ.

Результаты, представленные на рис. 1, показывают, что композит PGB0 в целом демонстрирует меньший износ по сравнению с чистым PPS. Отмечено, что износ PGB0 возрастает с увеличением нагрузки при скорости скольжения 2,0423 м/с (рис. 1). Это может быть связано с увеличением тепловыделения в зоне контакта под воздействием нагрузки, что приводит к размягчению полимерной матрицы и снижению сопротивления сдвигу, необходимого для удаления материала с поверхности образца.

Таблица 3

Table 3

Исследование изнашивания PGB0 Wear investigation of PGB0

№ п/п	Нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Время, мин	Ср. износ, мкм
1	30	200	20	5,58
2	30	500	50	123,52
3	30	800	80	142,25
4	50	200	20	163,22
5	50	500	50	189,42
6	50	800	80	192,87
7	70	200	20	419,12
8	70	500	50	822,53
9	70	800	80	825,15

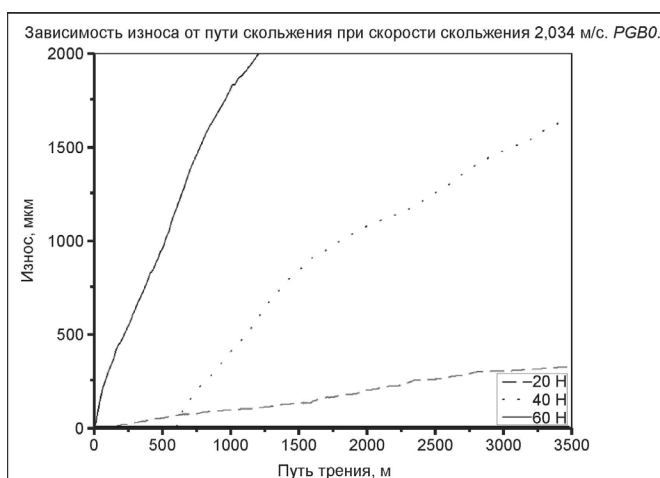


Рис. 1. Зависимость износа от пути скольжения. PGB0

Fig. 1. Wear vs Sliding Distance. PGB0

Исследование процесса изнашивания PGB1 в зависимости от нагрузки

Этот раздел посвящен исследованию влияния 1 % бентонитовой глины на износостойкость композита. Как указано в табл. 4, эксперимент был направлен на оценку износа в зависимости от пройденного пути при постоянной скорости скольжения 2,0434 м/с и различных значениях контактной нагрузки. Целью анализа являлось понимание влияния добавления 1 % глины на износостойкость композита при различных нагрузках.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что износ увеличивается с ростом контактной нагрузки. Такая тенденция наблюдалась для всех исследованных образцов. Сравнение

Таблица 4

Table 4

Исследование износа PGB1
Wear investigation for PGB1

№ п/п	Нагрузка, Н	Скорость, об/мин	Время, мин	Ср. износ, мкм
1	30	200	20	3,54
2	30	500	50	42,35
3	30	800	80	46,89
4	50	200	20	57,35
5	50	500	50	98,96
6	50	800	80	100,78
7	70	200	20	105,42
8	70	500	50	110,54
9	70	800	80	117,67

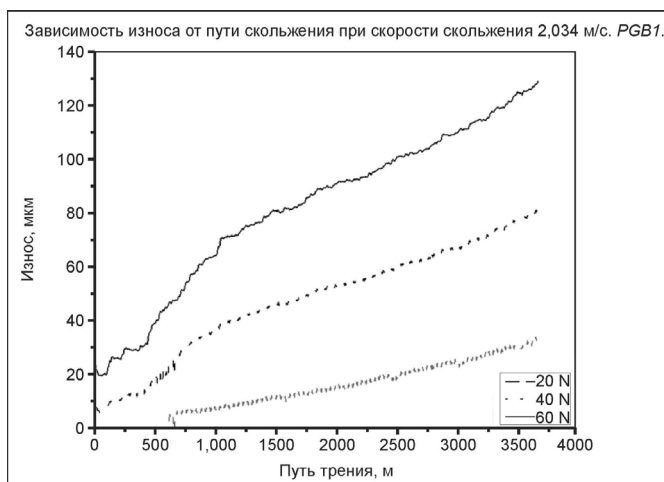


Рис. 2. Зависимость износа от пути скольжения. PGB1

Fig. 2. Wear vs Sliding distance. PGB1

с композитом PGB0 (рис. 2) демонстрирует, что добавление 1 % глины приводит к снижению износа, что, вероятно, связано с действием частиц глины в качестве твердой смазки и повышением сопротивления износу при аналогичных условиях эксплуатации. Однако при увеличении нагрузки наблюдается увеличение износа композита PGB1.

Влияние скорости скольжения на износ при постоянной нагрузке 20 Н

В данном разделе анализируется влияние скорости скольжения на износ при фиксированной контактной нагрузке 20 Н. Результаты, представленные на рис. 3, указывают на значительный абразивный износ материала. Износ возрастает

с увеличением скорости скольжения, что соответствует трехстадийному характеру износа: начальное увеличение, достижение максимального значения и установившаяся стадия износа для каждой скорости скольжения. Минимальный износ наблюдается при скорости 2,0423 м/с, а максимальный – при 6,1269 м/с, что подчеркивает значительное влияние скорости скольжения на процесс изнашивания.

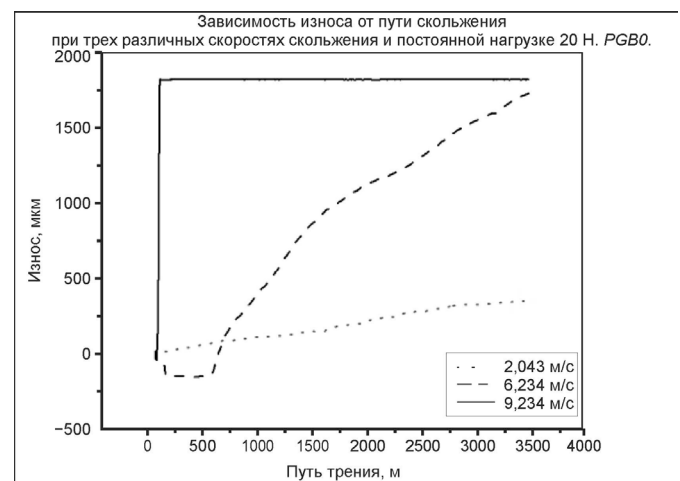


Рис. 3. Влияние скорости скольжения на износ при постоянной нагрузке 20 Н

Рис. 3. Effect of Sliding velocity on Wear at constant Load of 20 N

Влияние концентрации бентонитовой глины на износостойкость композита

Кривая износа (рис. 4) демонстрирует влияние содержания бентонитовой глины на износ композита. Композиты без глины характеризу-

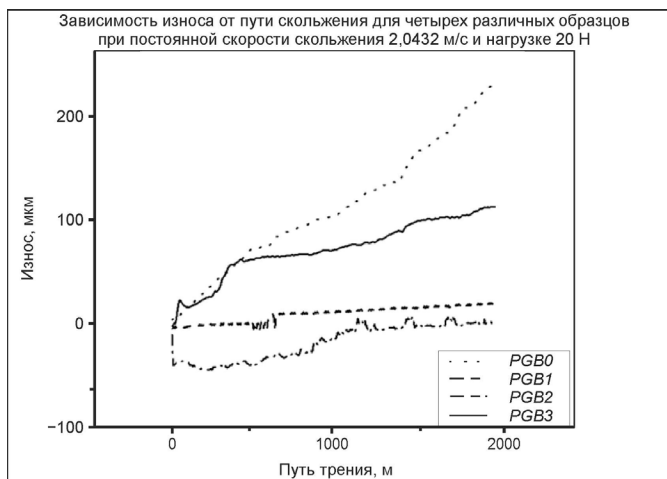


Рис. 4. Влияние бентонитовой глины на величину износа

Fig. 4. Effect of bentonite clay on Wear value

ются наибольшим износом. Повышение содержания глины до 3 % приводит к снижению износа. Дальнейшее повышение содержания глины (до 5 и 7 %) вызывает увеличение износа, что свидетельствует о существовании оптимальной концентрации глины.

Рис. 4 показывает снижение износа для композитов с 1 и 3 % бентонитовой глины и увеличение износа для композитов с 5 и 7 % глины. Композит с 7 % глины демонстрирует наибольший износ. Следовательно, для минимизации образования пыли при использовании в тормозных и фрикционных накладках содержание глины не должно превышать 3 %. Отмечено также увеличение износа с ростом нагрузки. Полученные результаты подтверждаются данными микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), представленными на рис. 5 и 6. На начальном этапе испытаний наблюдается

увеличение скорости износа, что соответствует теории адгезионного изнашивания и обусловлено зацеплением о выступы на поверхности диска и композитного стержня. По мере продолжения испытаний происходит перенос материала на диск, что временно увеличивает скорость изнашивания. На заключительной стадии скорость износа стабилизируется. В случае образцов с бентонитовой глиной на начальных стадиях наблюдается снижение износа, связанное с адгезией и абразивным воздействием агломерированной глины. Композиты с 1 и 3 % глины показывают меньший износ, в то время как композиты с содержанием глины 5 % и более демонстрируют повышенный износ вследствие агломерации глины (табл. 5).

Влияние формирования слоя переноса на износ

Формирование слоя переноса на контртеле играет важную роль в определении трибологического поведения полимерных композитов. После формирования пленки переноса взаимодействие происходит между полимером и материалом пленки, а не с контртелом. Изучение характеристик пленок переноса необходимо для понимания механизмов изнашивания. Морфология поверхности износа композитов с различным содержанием глины, исследованная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), представлена на рис. 5.

На рис. 5, а показано, что композитный стержень с бентонитовой глиной имеет меньше признаков адгезионного износа и задиров по сравнению с композитом без глины. Рис. 5, б, в демонстрируют наличие усталостных трещин

Таблица 5

Table 5

Данные исследования зависимости износа от нагрузки

Investigation data Wear v/s Load

Образец	Среднее значение износа, мкм		
	20 Н	40 Н	60 Н
PGB0	5,58	166,14	422,1
PGB1	3,6	58,32	112,32
PGB2	96,3	128,52	131,58
PGB3	274,86	362,16	402,66
PGB4	289,98	521,46	604,26

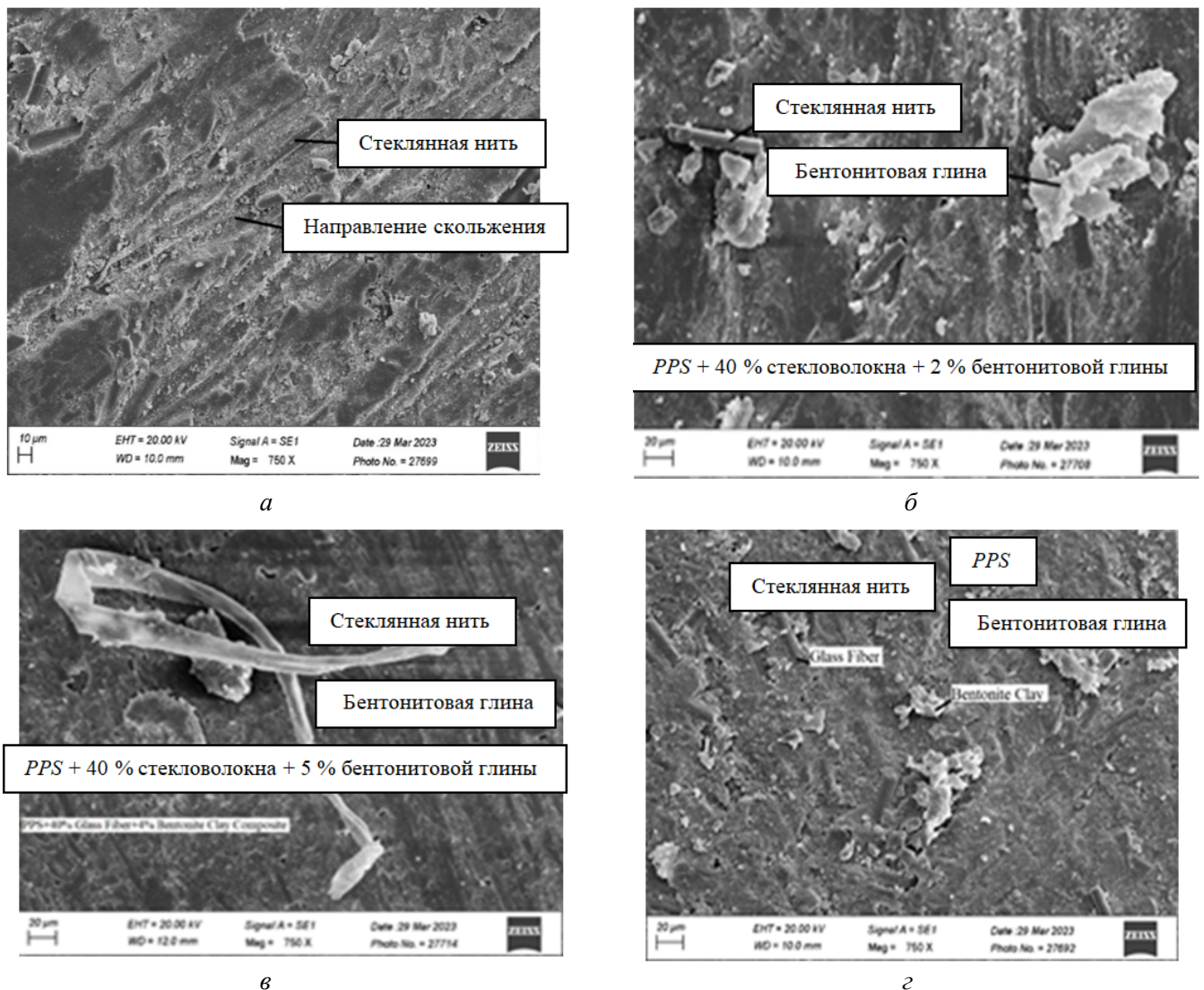


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности стержня из композиционного материала:

a – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

Рис. 5. SEM images of the composite pin surface:

a – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

и агломерированных абразивных частиц в композите PPS / 40 % GF / 5 % бентонитовой глины, что указывает на снижение износа с увеличением содержания глины. На стальном диске наблюдается толстая несвязная пленка перена, что соответствует более низкой износостойкости композита PPS + GF без добавления глины. Рис. 5, *г* показывает, что в композите с 5 % бентонитовой глины происходит агломерация частиц глины, это увеличивает износ в результате адгезионных и абразивных процессов. Таким образом, небольшое количество бентонитовой глины предотвращает заедание и прилипание к матрице, способствуя формированию качественной переносной пленки на стальной поверхности и повышая износостойкость по срав-

нению с композитом PGB0 (без глины). Однако при высокой концентрации глины происходит агломерация частиц, что приводит к увеличению износа.

Данные спектроскопии

Энергодисперсионную спектроскопию (EDS) использовали для элементного анализа смесей. На рис. 6 представлены результаты EDS-анализа образцов PGB0, PGB1, PGB2 и PGB3, демонстрирующие их качественный состав. Система EDS, интегрированная со сканирующим электронным микроскопом (SEM), позволила провести химический анализ образцов. В спектрах EDS были идентифицированы следующие элементы: кремний, углерод, хлор, железо и каль-

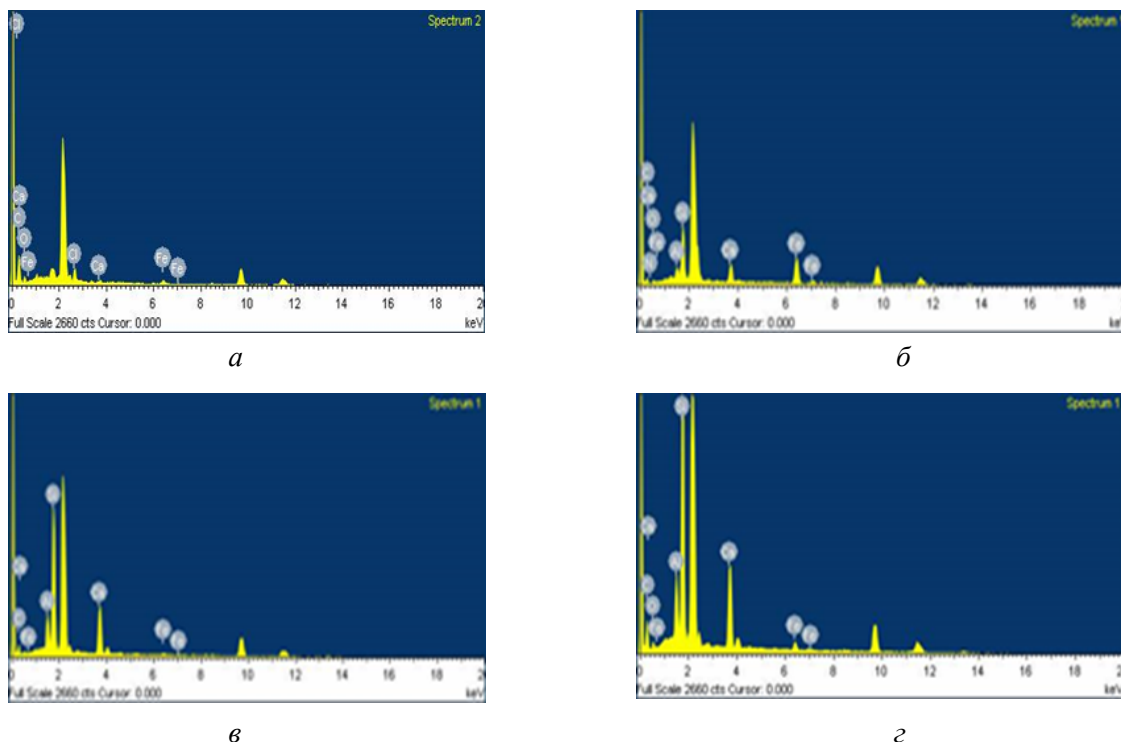


Рис. 6. ЭДС-спектры:
a – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

Рис. 6. EDS Spectrum of:
a – PGB0; *б* – PGB1; *в* – PGB2; *г* – PGB3

ций. Присутствие железа и кальция, вероятно, связано с износом стальных дисков и переносом продуктов износа на поверхность образцов.

На рис. 6, *a–г* видно наличие бентонита, углерода и хлора, что подтверждает включение полифениленсульфида (PPS) и стекловолокна в состав композита. EDS-анализ также показывает увеличение концентрации алюминия, железа и кальция.

Влияние скорости скольжения на износ при различной нагрузке

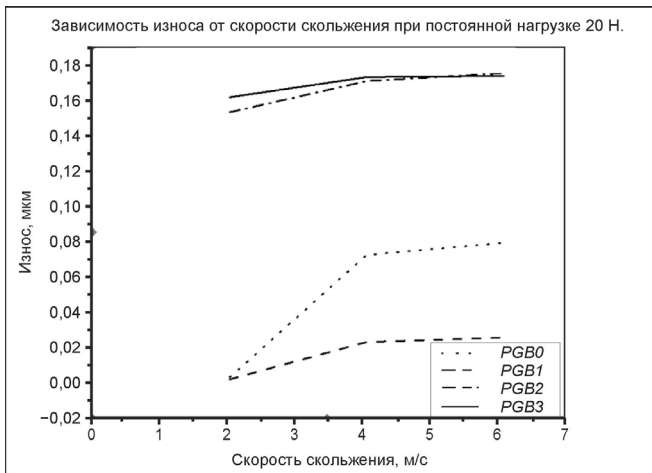
Планируется проведение дальнейших исследований для сравнения трибологических характеристик образцов с различным содержанием глины при постоянных значениях нагрузки и скорости скольжения.

На рис. 7 представлена зависимость износа от скорости скольжения для каждого образца. Увеличение скорости скольжения приводит к росту износа. Этот эффект может быть обусловлен преобладанием адгезионного механизма износа над абразивным. В рамках настоящего исследования изучали влияние бентонитовой глины на изнашивание композитов PPS + GF.

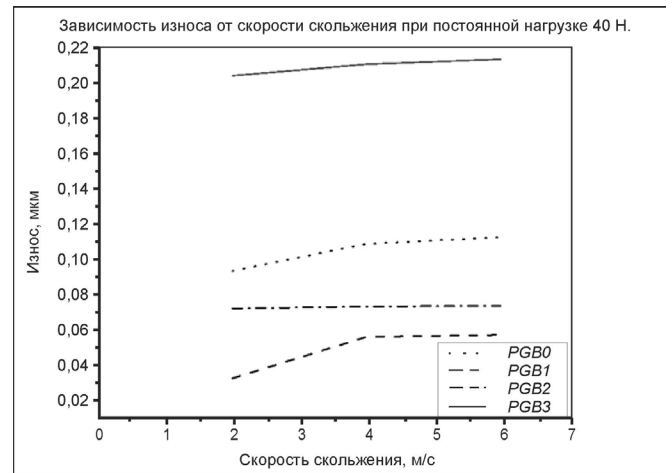
Влияние нагрузки на износ при минимальной скорости скольжения

Анализ влияния нагрузки на изнашивание при минимальной скорости скольжения важен для планирования экспериментов с использованием метода Тагучи. На рис. 8 показано, что увеличение нагрузки приводит к резкому увеличению износа для образца PGB0 (без глины). Образцы, содержащие бентонитовую глину, демонстрируют меньший рост износа с увеличением нагрузки по сравнению с PGB0.

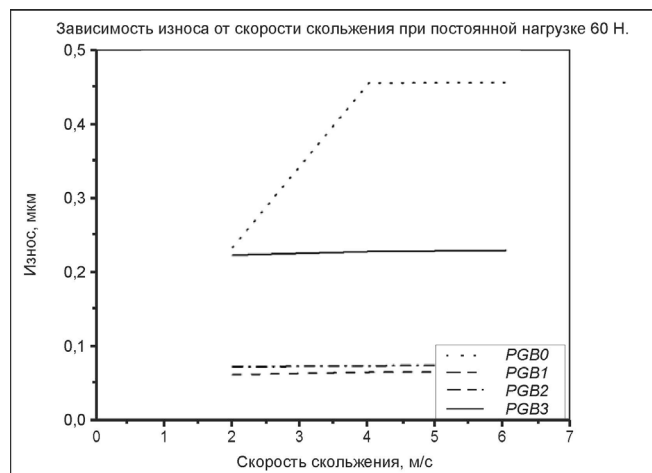
Увеличение нагрузки приводит к повышению температуры в зоне контакта, что размягчает полимерную матрицу и способствует расслоению полимерной пленки, обнажая стекловолокно. Введение бентонитовой глины замедляет процесс расслоения и снижает скорость роста износа по сравнению с PGB0. В образце PGB0 трение обусловлено взаимодействием между рассеченными и сломанными стекловолоконками и выступами на поверхности диска, что приводит к износу. Частицы бентонитовой глины, которые действуют как твердая смазка, снижают износ, задерживая перенос композитного материала с поверхности образца на диск.



а



б



в

Рис. 7. Зависимость износа от скорости скольжения

Fig. 7. Wear vs Sliding velocity

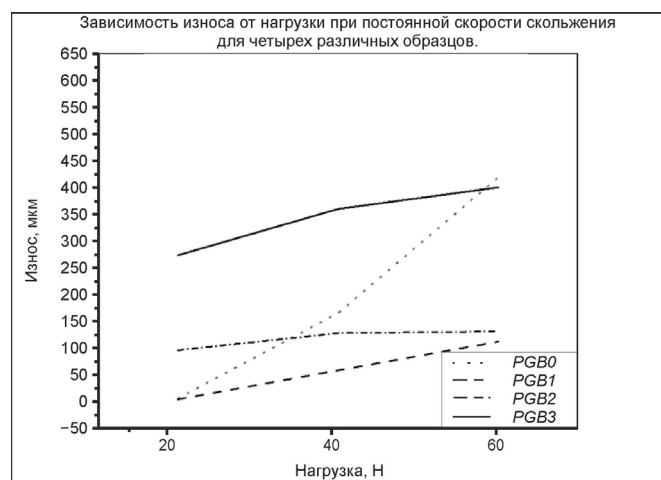


Рис. 8. Зависимость износа от нагрузки

Fig. 8. Wear vs Load

Заключение

В результате исследования влияния бентонитовой глины на износ композитов PPS + GF были сделаны следующие выводы.

– **Оптимизация содержания глины снижает износ:** добавление бентонитовой глины до определенной концентрации (до 3 % по массе) приводит к снижению скорости изнашивания. Это свидетельствует о том, что умеренное введение глины повышает износостойкость композита. Наименьший износ (3,6 мкм) наблюдался при содержании глины 3 %, в то время как для композита без глины при той же нагрузке (20 Н) значение износа составляло 5,58 мкм. При увеличении нагрузки до 40 и 60 Н износ композита без глины (166 и 422 мкм соответственно) значительно превышал износ композита с 3 % глины (58,32 и 112,32 мкм соответственно).

– **Превышение оптимального содержания глины увеличивает износ:** при концентрации глины выше оптимальной наблюдается увеличение скорости изнашивания. Вероятно, это связано с изменением механических свойств композита. При содержании глины более 2 % наблюдается существенное увеличение износа: при 5 и 9 % глины значения износа при нагрузке 20 Н составляют 96,3 и 274,86 мкм соответственно. Эти значения значительно превышают износ композита с 2 % глины. Аналогичная закономерность наблюдается и при более высоких нагрузках (40 и 60 Н).

– **Агломерация глины ухудшает износостойкость:** высокая концентрация бентонитовой глины может приводить к агломерации частиц в матрице PPS + GF. Агломераты, действуя как абразив, увеличивают скорость изнашивания.

– **Глина влияет на коэффициент трения:** добавление бентонитовой глины может снижать коэффициент трения благодаря ее смазывающим свойствам.

– **Небольшое количество глины улучшает трибологические характеристики:** небольшое количество бентонитовой глины (до 3 %) позволяет одновременно снизить износ и поддерживать оптимальный коэффициент трения, обеспечивая баланс между износостойкостью и фрикционными свойствами.

Список литературы

1. Tribological Investigations of Hemp Reinforced NAO Brake Friction Polymer Composites with Varying Percentage of Resin Loading / M. Naidu, A. Bhosale, M. Gaikwad, S. Salunkhe, R. Šep, E. Abouel Nasr // *Frontiers in Materials*. – 2024. – Vol. 11. – DOI: 10.3389/fmats.2024.1348265.
2. Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers / M. Naidu, A. Bhosale, Y. Munde, S. Salunkhe, H.M.A. Hussein // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.3390/polym15010188.
3. Characterisation of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – a critical review / S. Huang, Q. Fu, L. Yan, B. Kasal // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1441–84. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.076.
4. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics / L. Zhao, Y. Yu, H. Huang, X. Yin, J. Peng, J. Sun, L. Huang, Y. Tang, L. Wang // *Composites, Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 174. – P. 106790. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.001.
5. Niu F., He R., Li J. Effects of clay and surface plasma-treated carbon fiber on wear behavior of thermoplastic POM composites // *Surface and Interface Analysis*. – 2018. – Vol. 50 (1). – P. 96–100. – DOI: 10.1002/sia.6342.
6. Effect of clay content on the morphological, thermo-mechanical and chemical resistance properties of propionic anhydride treated jute fiber/polyethylene/nanoclay nanocomposites / F. Md Hossen, S. Hamdan, R. Md Rahman, S. Md Islam, F.K. Liew, J.C.H. Lai, M. Md Rahman // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. – 2016. – Vol. 90. – P. 404–411. – DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.006.
7. Fabrication of modified MMT/Glass/Vinylester multiscale composites and their mechanical properties / G. Mittal, V. Dhand, J.I. Ryu, K.Y. Rhee, H.-J. Kim, D.H. Jung // *Journal of Nanomaterials*. – 2015. – Vol. 2015 (1). – DOI: 10.1155/2015/506029.
8. Carnevale P., Rasool S., Bersee H.E.N. Fibre-matrix interfaces in carbon fibre reinforced PPS composites: damage initiation and propagation in tensile tests // *Composite Interfaces*. – 2014. – Vol. 21 (4). – P. 337–352. – DOI: 10.1080/15685543.2014.877288.
9. Sarkar P., Modak N., Sahoo P. Reciprocating friction and wear behavior of al particulate glass fiber reinforced epoxy composite // *International Conference on Polymer Composites (ICPC-2014): Conference Paper*. – Surathkal, Mangalore, India, 2014. – P. 163. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/273950830> (accessed: 10.02.2025).
10. Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers

against steel counterface // *Tribology International*. – 2004. – Vol. 37 (9). – P. 727–732. – DOI: 10.1016/j.triboint.2004.03.002.

11. Effect of bentonite clay and polypropylene matrix on the properties of silk and glass fiber-reinforced hybrid composites / Md R.H. Mazumder, F. Numera, A. Al-Asif, M. Hasan // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2021. – Vol. 34 (12). – P. 1654–1665. – DOI: 10.1177/0892705719878231.

12. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. II. Filled with PTFE / Z. Chen, X. Liu, T. Li, R. Lü // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 101 (2). – P. 969–977. – DOI: 10.1002/app.22061. – DOI: 10.1002/app.22061.

13. Influence of twin-screw elements on the dispersion of nano-clay in vinyl ester polymer composites using Taguchi's orthogonal array technique / R.G. Raj, G.G. Tanuja, C.L. Kumar, N.A.P. Nittala, M.K. Srinath, S.S. Abdullaev, D. Bandhu // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2024. – Vol. 18 (5). – P. 3271–3285. – DOI: 10.1007/s12008-023-01492-5.

14. *Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S.* Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations // *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. – 2024. – Vol. 31 (1s). – DOI: 10.52783/cana.v31.559.

15. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer-based materials used for hearing aid casing / A. Gosavi, A. Kulkarni, Y. Dama, A. Deshpande, B. Jogi // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 49. – P. 2433–2441. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.519.

16. *Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A.* A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2311 (1). – DOI: 10.1063/5.0035408.

17. Experimental investigation of dry sliding wear behavior of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach / A. Paturkar, A. Mache, A. Deshpande, A. Kulkarni // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (11). – P. 23974–23983. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.

18. *Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A.* Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 59 (1). – P. 734–741. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.

19. *Чинчаникар С.* Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12X18H10T) // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 40–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

20. *Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S.* Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite // *European Journal of Engineering and Technology Research*. – 2018. – Vol. 1. – P. 25–29. – DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

Конфликт интересов

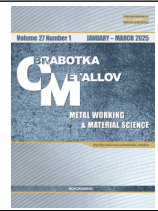
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science





Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov





Wear behavior study of glass fiber and organic clay reinforced poly-phenylene-sulfide (PPS) composites material

Vishavjit Bhanavase^a, Bhagwan Jogi^{b, *}, Yogiraj Dama^c

Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Lonere, Raigad, Maharashtra, 402103, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-2268-2693>,  vlbhanavase@sinhgad.edu; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-2099-7533>,  bfjogi@dbatu.ac.in;

^c  <https://orcid.org/0009-0008-5404-4347>,  yogirajdama@dbatu.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 January 2025

Revised: 23 January 2025

Accepted: 03 February 2025

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Poly-phenylene-sulphide (PPS)

Glass fibre

Bentonite clay

Friction and wear

Tribological testing using the

“pin-on-disc” method

Taguchi design

Wear behavior

ABSTRACT

Introduction. This study investigates the influence of key operating parameters (load, sliding velocity, and sliding distance) on the wear behavior of composites made of 40 % glass fiber and polyphenylene sulphide (PPS), with varying weight fractions of bentonite clay. The main purpose was to evaluate how different experimental conditions affect the wear characteristics. To achieve this, experiments were conducted using a *Taguchi L9* orthogonal array at three levels of complexity. The tribological tests were performed on a pin-on-disc setup, following *ASTM G99* standards, with six material samples containing different weight fractions of bentonite clay. The results show that wear of the original (virgin) sample increases with an increase in the applied average load. In contrast, samples containing bentonite clay exhibit a decrease in wear with increasing average load. Furthermore, an increase in the bentonite clay content leads to a significant reduction in wear, but a further increase to 7 % clay results in a noticeable increase in wear values. **Research Methods.** This study investigates the effect of load, sliding velocity, and weight fraction of bentonite clay on the wear and coefficient of friction (*COF*) of a composite material. Composite samples with varying clay content were tested using a pin-on-disc setup, and wear and *COF* were measured as dependent parameters. Scanning electron microscopy (*SEM*) was used to analyze the wear surfaces after testing to reveal the influence of independent parameters on wear mechanisms and surface morphology. The results revealed important trends in the friction and wear behavior under different conditions. Comparative analysis provided insights into optimizing the tribological performance of the material by balancing load, velocity, and clay content. **Result and Discussion.** This study investigates the effect of bentonite clay addition on the wear behaviour of *PPS + GF* composites. The findings reveal that wear decreases by up to 3 % with an increase in the weight percentage of bentonite clay, but increases again with a further increase in clay content. It is noted that a higher weight fraction of bentonite clay leads to an increase in the specific wear rate and a decrease in the coefficient of friction due to the manifestation of an abrasive wear mechanism caused by clay agglomeration. Conversely, a lower clay weight fraction promotes a reduction in the wear rate while increasing the coefficient of friction. This work intends to address the dual challenge of performance optimization and cost reduction in friction and wear applications. **The need of the work.** The purpose of this research is to develop an organic polymer composite that exhibits both high performance and cost-effectiveness. One of the key objectives is to create such a composite material using bentonite clay, an organic and readily available material that can be sourced at a low cost. This will enable the production of a competitively priced composite without compromising quality. Another goal of the research is to replace existing friction materials in brake and clutch systems with the newly developed composite, potentially improving its performance and durability. Furthermore, this work aims to create a composite material suitable for use in sliding bearings, particularly those operating in corrosive environments. Such a composite should possess increased resistance to chemical degradation, ensuring an extended lifespan and reliability under severe operating conditions.

For citation: Bhanavase V., Jogi B.F., Dama Y.B. Wear behavior study of glass fiber and organic clay reinforced poly-phenylene-sulfide (PPS) composites material. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 203–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-203-217. (In Russian).

* Corresponding author

Jogi Bhagwan Fatru, Professor

Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University,

Lonere, Raigad,

402103, Maharashtra, India

Tel.: +91 942-116-6370, e-mail: bfjogi@dbatu.ac.in

References

1. Naidu M., Bhosale A., Gaikwad M., Salunkhe S., Čep R., Abouel Nasr E. Tribological investigations of hemp reinforced NAO brake friction polymer composites with varying percentage of resin loading. *Frontiers in Materials*, 2024, vol. 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1348265.
2. Naidu M., Bhosale A., Munde Y., Salunkhe S., Hussein H.M.A. Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers. *Polymers*, 2023, vol. 15 (1). DOI: 10.3390/polym15010188.
3. Huang S., Fu Q., Yan L., Kasal B. Characterisation of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 13, pp. 1441–1484. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.076.
4. Zhao L., Yu Y., Huang H., Yin X., Peng J., Sun J., Huang L., Tang Y., Wang L. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics. *Composites, Part B: Engineering*, 2019, vol. 174, p. 106790. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.001.
5. Niu F., He R., Li J. Effects of clay and surface plasma-treated carbon fiber on wear behavior of thermoplastic POM composites. *Surface and Interface Analysis*, 2018, vol. 50 (1), pp. 96–100. DOI: 10.1002/sia.6342.
6. Hossen Md F., Sinin H., Rahman Md R., Islam Md S., Liew F.K., J.C.H. Lai, Rahman Md M. Effect of clay content on the morphological, thermo-mechanical and chemical resistance properties of propionic anhydride treated jute fiber/polyethylene/nanoclay nanocomposites. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2016, vol. 90, pp. 404–411. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.05.006.
7. Mittal G., Dhand V., Ryu J.I., Rhee K.Y., Kim H.-J., Jung D.H. Fabrication of modified MMT/Glass/Vinylester multiscale composites and their mechanical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2015, vol. 2015 (1). DOI: 10.1155/2015/506029.
8. Carnevale P., Rasool S., Bersee H.E.N. Fibre-matrix interfaces in carbon fibre reinforced pps composites: damage initiation and propagation in tensile tests. *Composite Interfaces*, 2014, vol. 21 (4), pp. 337–352. DOI: 10.1080/15685543.2014.877288.
9. Sarkar P., Modak N., Sahoo P. Reciprocating friction and wear behavior of al particulate glass fiber reinforced epoxy composite. *International Conference on Polymer Composites (ICPC-2014): Conference Paper*, Surathkal, Mangalore, India, 2014, p. 163. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/273950830> (accessed 10.02.2025).
10. Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*, 2004, vol. 37 (9), pp. 727–732. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.03.002.
11. Mazumder Md R.H., Numera F., Al-Asif A., Hasan M. Effect of bentonite clay and polypropylene matrix on the properties of silk and glass fiber-reinforced hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2021, vol. 34 (12), pp. 1654–1665. DOI: 10.1177/0892705719878231.
12. Chen Z., Liu X., Li T., Lü R. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. II. Filled with PTFE. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 101 (2), pp. 969–977. DOI: 10.1002/app.22061.
13. Raj R.G., Tanuja G.G., Kumar C.L., Nittala N.A.P., Srinath M.K., Abdullaev S.S., Bandhu D. Influence of twin-screw elements on dispersion of nano-clay in vinyl ester polymer composites using Taguchi's orthogonal array technique. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, vol. 18 (5), pp. 3271–3285. DOI: 10.1007/s12008-023-01492-5.
14. Dama Y.B., Jogi B.F., Pawade R.S. Application of nonlinear analysis in evaluating additive manufacturing processes for engineering design features: a study and recommendations. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31(1s). DOI: 10.52783/cana.v31.559.
15. Gosavi A., Kulkarni A., Dama Y., Deshpande A., Jogi B. Comparative analysis of drop impact resistance for different polymer-based materials used for hearing aid casing. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 49, pp. 2433–2441. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.519.
16. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311 (1). DOI: 10.1063/5.0035408.
17. Paturkar A., Mache A., Deshpande A., Kulkarni A. Experimental investigation of dry sliding wear behavior of jute/epoxy and jute/glass/epoxy hybrids using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (11), pp. 23974–23983. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.190.
18. Satkar A.R., Mache A., Kulkarni A. Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 59 (1), pp. 734–741. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.464.



19. Chinchanikar S. Modeling of sliding wear characteristics of Polytetrafluoroethylene (PTFE) composite reinforced with carbon fiber against SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 40–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-40-52.

20. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Investigation of flexural properties of glass-Kevlar hybrid composite. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2018, vol. 1, pp. 25–29. DOI: 10.24018/ejeng.2016.1.1.90.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).