



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Комплексное численное и экспериментальное исследование трибологических характеристик композиционного материала на основе ПТФЭ

Абхиджит Дешпанде^{1, a, *}, Атул Кулкарни^{2, b}, Прашант Анерао^{2, c},
Лина Дешпанде^{1, d}, Авинаш Соматкар^{1, e}

¹ Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуна - 411048, Индия

² Технологический институт Вишвакарма, Пуна, Махараштра, 411037, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8956-3093>,  abhijeet.deshpande@viit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, atul.kulkarni@vit.edu;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0353-7420>,  prashant.anerao@vit.edu, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7426-2028>,  leena.deshpande@viit.ac.in;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>,  avinash.somatkar@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678.073

История статьи:

Поступила: 22 января 2025

Рецензирование: 17 февраля 2025

Принята к печати: 27 марта 2025

Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:

Экологичное производство

Композиты и возобновляемость

ресурсов

Конечно-элементный анализ (КЭА)

Стекло

Углерод

ПТФЭ (PTFE)

Характеристики износа

АННОТАЦИЯ

Введение. Одними из наиболее значимых явлений в каждой отрасли промышленности оказываются трение и износ, которые неизбежно возникают при относительном движении между однородными или разнородными материалами. Считается, что значительная доля мирового производства энергии расходуется на преодоление трения и износа, это делает их важнейшими факторами в энергоэффективности и устойчивости. В последнее время благодаря достижениям в материаловедении, технологиях смазочных материалов и инновационным методам проектирования удалось значительно снизить трение и износ, что ведет к существенной экономии энергии и увеличению срока службы компонентов. Политетрафторэтилен (ПТФЭ), среди прочих материалов, произвел революцию в трибологической отрасли, став высокоэффективным синтетическим полимером. Это обусловлено его выдающимися свойствами, такими как низкий коэффициент трения, химическая инертность, термическая стабильность, антипригарные свойства и биосовместимость. Эти уникальные свойства делают ПТФЭ идеальным материалом для различных промышленных применений, от аэрокосмической отрасли до биомедицинской. **Цель работы:** проведение комплексного численного и экспериментального исследования трибологических свойств композита на основе ПТФЭ. В качестве исследуемых материалов выбраны чистый ПТФЭ, ПТФЭ с 25 % С, и ПТФЭ с 20 % стекла. Испытания проводили, применяя в качестве контртела нержавеющей сталь (SS 304). Трибологические испытания и последующую оценку осуществляли в условиях сухого трения скольжения с учетом ключевых параметров, таких как нагрузка, скорость трения и температура. Разработку эмпирической модели, использующей экспериментальные данные для прогнозирования износостойкости этих материалов, проводили с помощью методологии поверхности отклика (МПО). Эмпирические модели разрабатывали для понимания влияния параметров процесса на поведение при износе и для оптимизации условий эксплуатации с целью минимизации потери материала. **Методы исследования.** В качестве теоретической основы для прогнозирования потери объема и удельной скорости износа на основе численного моделирования применяли модель износа Арчарда. Коэффициент износа (K) определяли в ходе экспериментальных испытаний и использовали в качестве входного параметра в численных моделях. Численное моделирование разрабатывали с помощью программного обеспечения для конечно-элементного анализа ANSYS, что позволяло моделировать сложные трибологические взаимодействия между композиционными материалами и контртелом. Для структурирования экспериментов использовали центральный композиционный ротационный план (CCRD) в рамках МПО, эксперименты проводили в условиях сухого трения скольжения по схеме «палец – диск». В качестве входных параметров для экспериментов выбраны нагрузка (от 15 до 200 Н), скорость трения (от 400 до 1000 об/мин) и температура (от 60 до 200 °C). Каждый эксперимент выполнялся на протяжении 5 км скольжения, чтобы обеспечить достаточный износ для анализа. Для каждого материала проводили в общей сложности 20 экспериментов, что обеспечило полный набор данных для статистического анализа и проверки модели. **Результаты и обсуждение.** Результаты исследования подчеркивают эффективность численного моделирования в прогнозировании износостойкости композитов на основе ПТФЭ в условиях сухого трения скольжения. Экспериментальные исследования показывают, что чистый ПТФЭ обладает низкой механической прочностью, что приводит к высокой скорости износа, в то время как ПТФЭ с добавками углерода и стекла демонстрирует улучшенные характеристики износостойкости. Добавление углерода в ПТФЭ повышает характеристики композита, формируя на контртеле стабильную пленку переноса, тогда как добавление стекла способствует увеличению твердости и, как следствие, уменьшению потерь материала. Эмпирические модели, разработанные с использованием методологии поверхности отклика (МПО), подтверждают, что наиболее значимым параметром, влияющим на износ, является приложенная к пальцу нагрузка, за которой следуют скорость трения и температура. Численное моделирование на основе модели износа Арчарда хорошо согласуется с экспериментальными данными, подтверждая точность численного моделирования. Данное исследование способствует углублению знаний об использовании композитов на основе ПТФЭ для увеличения срока службы и надежности промышленных изделий.

Для цитирования: Комплексное численное и экспериментальное исследование трибологических характеристик композиционного материала на основе ПТФЭ / А. Дешпанде, А.П. Кулкарни, П. Анерао, Л. Дешпанде, А. Соматкар // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 219–237. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-219-237.

*Адрес для переписки

Кулкарни Атул П., профессор

Технологический институт Вишвакарма,

Пуна, Махараштра, 411037, Индия

Тел.: (+91) 9922914460, e-mail: atul.kulkarni@vit.edu

Введение

В последние годы наблюдается растущая тенденция к замене металлов полимерами в трибологических системах. Это обусловлено рядом преимуществ, таких как самосмазывание, химическая инертность, низкая плотность и, в некоторых случаях, биосовместимость. Данный переход стимулировал активную разработку высокоэффективных и экономически привлекательных полимерных композиционных материалов. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) занимает лидирующие позиции среди полимерных материалов, востребованных в горнодобывающей, автомобильной, аэрокосмической, электротехнической и электронной промышленности [1]. Благодаря уникальному сочетанию свойств, включая низкий коэффициент трения, исключительную химическую инертность, высокую термическую стабильность и антипригарные свойства, ПТФЭ эффективно снижает трение и износ, формируя тонкую переносную пленку на контактирующей поверхности. Это свойство в совокупности с термической и химической стабильностью делает ПТФЭ перспективным материалом для широкого спектра промышленных применений, требующих повышенной износостойкости [2].

Тем не менее эксплуатационные характеристики чистого ПТФЭ зачастую оказываются недостаточными для ряда трибологических задач. С целью улучшения механических и трибологических свойств исследователи активно изучают модификацию ПТФЭ путем введения различных наполнителей. Традиционно применяются такие наполнители, как углеродные материалы, стекловолокно, графит, бронза, дисульфид молибдена (MoS_2), оксид алюминия, полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и нитевидный титанат калия (PTW) [3]. В последнее время растет интерес к перспективным наполнителям, таким как полифениленоксид, полиэфирсульфон и полипарафенилен-терефталамидные (PPDT) волокна, и изучаются их потенциальные преимущества в модификации трибологических свойств ПТФЭ [4].

Углеродные наполнители получили широкое распространение благодаря способности значительно повышать износостойкость, прочность на растяжение, ударную вязкость и твердость полимерной матрицы [3]. Оптимальное

улучшение свойств ПТФЭ достигается при введении углерода в концентрации от 15 до 30 % по объему [4]. Модификация ПТФЭ углеродом расширяет возможности его применения в условиях высоких нагрузок и температур. Аналогично введение стекловолокна в ПТФЭ приводит к повышению твердости, прочности на растяжение, допустимой нагрузки и износостойкости [5]. Композиты на основе ПТФЭ, армированные стекловолокном, демонстрируют повышенную устойчивость к деформации и стабильность размеров при высоких нагрузках и температурах [6], что обеспечивает их эффективное применение в качестве подшипников, уплотнений, прокладок и направляющих [7]. Добавление бронзы в концентрации от 40 до 60 % по объему также способствует повышению допустимой нагрузки, термической стабильности и износостойкости ПТФЭ [8]. Исследования показывают, что модификация ПТФЭ бронзой обеспечивает стабильность фрикционных характеристик и увеличивает срок службы компонентов, используемых в уплотнениях, подшипниках и втулках [9, 10]. Дальнейшее улучшение характеристик композита достигается при добавлении дисульфида молибдена (MoS_2) в концентрации 5 % по объему, что делает такой композит перспективным для применения в автомобильной промышленности [11–13].

Известно, что трибологические характеристики полимерных композитов в значительной степени зависят от ряда эксплуатационных параметров, включая нормальную нагрузку, площадь контакта, скорость скольжения, топографию контртела и температуру [14–18]. Перечисленные параметры оказывают влияние на формирование на контртеле стабильной пленки переноса, что способствует снижению интенсивности взаимодействия контактирующих поверхностей и, как следствие, уменьшению износа [19]. Вместе с тем некоторые параметры, такие как температура и нагрузка, могут инициировать деградацию полимерной матрицы и таким образом оказывать негативное влияние на трибологическое поведение композита в определенных условиях эксплуатации. Следовательно, тщательное изучение и оптимизация данных параметров представляются необходимыми для достижения максимальных эксплуатационных характеристик композиционного материала [20]. Кроме

того, очевидна взаимосвязь между указанными параметрами и фундаментальным явлением адгезии полимерных композиционных материалов, что, в свою очередь, отражается на их износостойкости.

Традиционно экспериментальные методы являются основным инструментом оценки износа и трения материалов в трибологических исследованиях. Однако проведение таких исследований сопряжено со значительными временными и ресурсными затратами, а также ограничениями в отношении детального изучения факторов, определяющих механизмы износа. В качестве эффективного дополнения к экспериментальным исследованиям все чаще используется численное моделирование, в частности конечно-элементный анализ (КЭА) в сочетании с моделью износа Арчарда [21]. Подобные модели позволяют имитировать процессы изнашивания, прогнозировать трибологическое поведение материалов при различных эксплуатационных условиях и оптимизировать конструкцию материала на этапе проектирования, предваряющем проведение физических испытаний. Метод конечных элементов зарекомендовал себя как универсальный и мощный инструмент для моделирования износа. При моделировании динамических нагрузок и различных условий окружающей среды КЭА обеспечивает всесторонний анализ распределения напряжений, деформаций и развития износа [22], позволяя исследовать локальные явления изнашивания и углубленно изучать механизмы износа. Исследования показывают, что точность прогнозирования модели износа значитель-

но возрастает при интеграции закона Арчарда в КЭА [23, 24].

В настоящей работе представлен численный подход, основанный на модели износа Арчарда, результаты которого верифицированы посредством экспериментального анализа. Исследовано трибологическое поведение трех композиционных материалов: чистого ПТФЭ (М1), ПТФЭ с 25%-м содержанием углерода (М2) и ПТФЭ с 20%-м содержанием стекловолокна (М3) в зависимости от таких эксплуатационных параметров, как нагрузка, скорость скольжения и температура. **Целью исследования** является также оценка прогностической способности предложенной численной модели для анализа износа.

Материалы и методы

Материалы

Образцы были изготовлены методом компрессионного формования и получены от компании Innominds Engineering (Пуна, Махараштра, Индия). Геометрические параметры образцов (радиус 5 мм, длина 32 мм) были обеспечены путем механической обработки на станке с ЧПУ SimpleTurn 5075 (ACEMicromatic, Бангалор, Индия). Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 1. Состав и физико-механические свойства исследованных композитов на основе ПТФЭ приведены в табл. 1. Известно, что оптимальная объемная доля углерода в композитах на основе ПТФЭ варьируется в диапазоне от 10 до 30 % в зависимости от конкретного промышленного применения. Однако в рамках

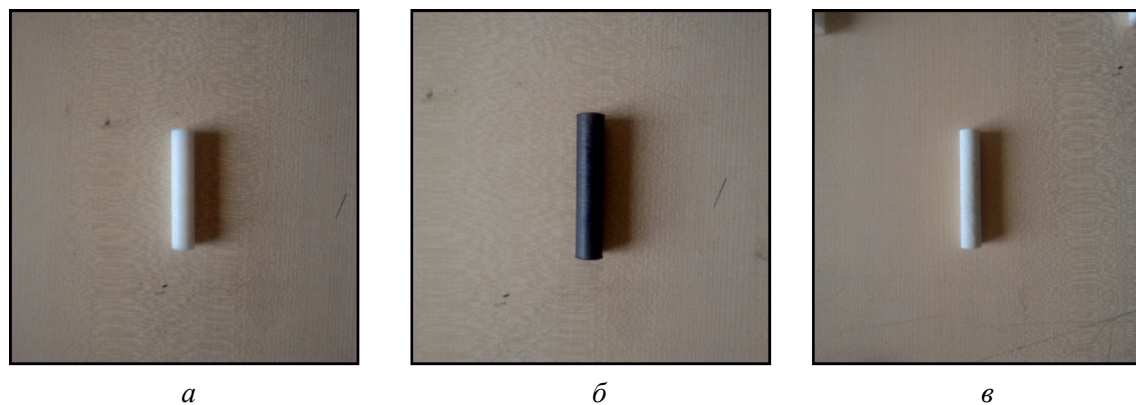


Рис. 1. Образцы для испытаний:

a – М1; *б* – М2; *в* – М3

Fig. 1. Test specimen:

a – М1; *б* – М2; *в* – М3

Таблица 1

Table 1

Свойства композиционного материала на основе ПТФЭ

Properties of PTFE-based composite

Свойства / Properties	Номер стандарта ASTM / ASTM Code	M1	M2	M3
Плотность, кг/м ³ / Density (kg/m ³)	ASTM D 792 [16]	2160	2244	2147
Прочность при растяжении, МПа / Tensile strength (MPa)	ASTM D 638 [16]	22,7	15,54	15,8
Прочность при сжатии, МПа / Compressive strength (MPa)	ASTM D 638 [16]	4,32	15,46	14,32
Твёрдость по Шору D / Shore D hardness	ASTM D 2240 [16]	49	65	61

настоящего исследования была выбрана 25%-я объемная концентрация углеродного наполнителя, обеспечивающая существенное повышение механических свойств, включая жесткость и прочность полимерной матрицы [9]. Данная концентрация также позволяет избежать агломерации наполнителя, его перегрузки и обеспечивает требуемую термическую стабильность, положительно влияющую на износостойкость материала. Аналогично введение 20 % (по объему) стекловолокна в ПТФЭ способствует повышению стабильности размеров за счет снижения эффектов ползучести и деформации под нагрузкой. Кроме того, упрочнение ПТФЭ стекловолокном повышает его химическую стойкость, расширяя возможности применения данного материала в агрессивных средах [16].

Экспериментальная методика

Трибологические испытания проводили на трибометре по схеме трения скольжения «палец – диск» (Ducom Instruments Pvt. Ltd., Бангалор, Индия). Принцип работы установки заключается во вращении диска с постоянной скоростью при фиксированном положении образца, прижатого к диску с заданной нагрузкой. Износ материала образца (пальца) инициируется относительным движением между образцом и вращающимся диском. В качестве контртела использовали диск, изготовленный из аустенитной нержавеющей стали (SS 304), диаметром 165 мм и толщиной 8 мм. Среднее значение твердости поверхности диска составило 58 HRC, а среднее значение шероховатости – 1,8 мкм. Для непре-

рывной регистрации перемещения образца, коррелирующего с величиной износа, использовали линейный дифференциальный трансформатор (LVDT). Установка была оснащена дополнительными приспособлениями, такими как нагреватель образца и климатическая камера, позволяющими моделировать условия эксплуатации, приближенные к реальным. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2. На рис. 2, а, б и в показаны приспособление для нагрева образца, испытательная камера и контроллер с программным обеспечением соответственно. Технические характеристики установки позволяют проводить испытания в диапазоне нагрузок от 0 до 200 Н и диапазоне скоростей вращения от 200 до 2000 об/мин. Диаметр используемого образца может варьироваться от 3 до 10 мм. Точность измерений LVDT составляет ± 1 % от измеренной величины износа (мкм), при этом минимальное измеряемое значение износа составляет 1 мкм, а максимальное – 1200 мкм. Предусмотрена возможность нагрева образца до температуры 400 °С. Диаметр дорожки износа варьируется в диапазоне от 55 до 154 мм, а в рамках настоящего исследования был зафиксирован на уровне 100 мм.

Диаметр дорожки трения выбирался в соответствии со скоростью вращения диска для обеспечения заданных скоростей скольжения в согласно плану эксперимента CCRD (Central Composite Rotatable Design, центральный композиционный ротatableльный план). Использование данного плана позволяет обеспечить равномерную дисперсию прогноза в точках,

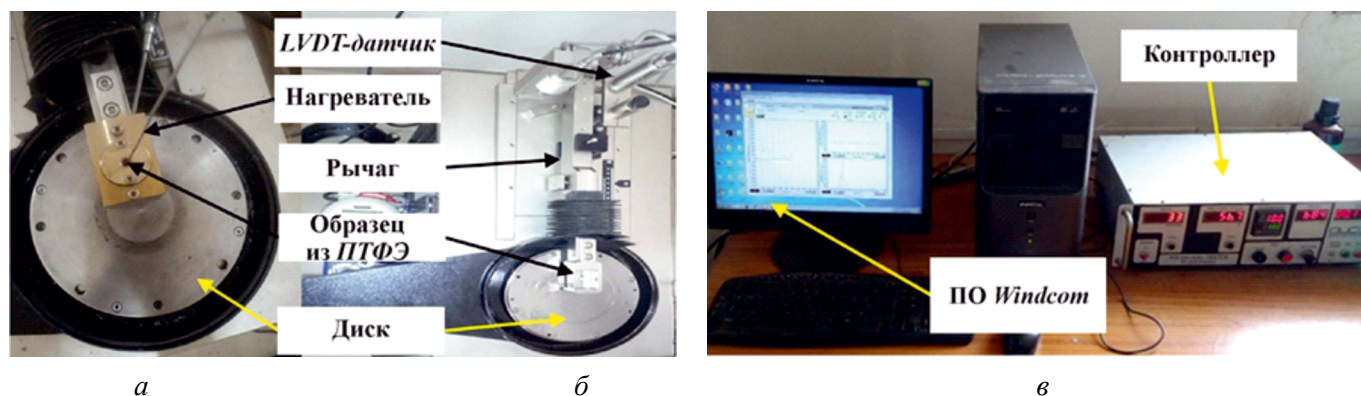


Рис. 2. Трибометр типа «палец – диск» с нагревателем образца (а), схема экспериментальной установки (б), контроллер и программное обеспечение Windcom (в)

Fig. 2. Pin-on-disc tribometer (a) pin heater, (b) experiment setup and (c) controller and Windcom software

равноудаленных от центра области проектирования. Уровни входных переменных в плане CCRD определяются с использованием значения α , рассчитываемого как $0,25(2^K)$, где K – количество входных переменных. В настоящем исследовании рассматривали три переменные (давление, скорость вращения и температура), что соответствует значению α , равному $\pm 1,682$. Исходные минимальные и максимальные значения для каждой из переменных устанавливали на основе фактических эксплуатационных ограничений и кодировали значениями $-1,682$

и $+1,682$ соответственно. Промежуточные уровни переменных определяли посредством линейной интерполяции с использованием следующего уравнения: $\alpha = a + b \times (\text{значение переменной})$. Полученные таким образом промежуточные уровни обеспечивают равномерное распределение значений переменных в заданном диапазоне. Уровни варьируемых параметров, выбранных для проведения эксперимента, представлены в табл. 2. Значения α и соответствующие им промежуточные уровни переменных приведены в табл. 3.

Таблица 2

Table 2

Значения параметров, используемые в экспериментах /
Levels of parameters for the experiments

Параметры / Parameters	Нормальная нагрузка, Н / Normal load (N)	Скорость скольжения, об/ мин / Sliding Speed (rpm)	Температура, °C / Temperature (°C)
Низкий уровень / Low level	15	400	60
Высокий уровень / High level	200	1000	200
Пройденное расстояние: 5 км / Track distance 5 km			

Таблица 3

Table 3

Значения альфа и соответствующие им значения переменных
Alpha values and corresponding variable levels

Значение альфа / Alpha value	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Нормальная нагрузка, Н / Normal load (N)	15	55	115	155	200
Скорость трения скольжения, об/мин / Sliding speed (rpm)	400	521	700	878	1000
Температура, °C / Temperature (°C)	60	88	130	171	200

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 4. Для всех исследованных образцов испытания проводили при фиксированной дистанции скольжения 5 км. Для каждого материала было выполнено 20 испытаний. Анализ матрицы экспериментов показывает, что эксперименты 15–20 представляют собой повторения центральной точки. Многократное повторение экспериментов в центральной точке позволяет оценить присущую методике эксперимента изменчивость результатов измерений, а также учесть экспериментальную ошибку, обусловленную неконтролируемыми факторами (например, колебаниями температуры окружающей среды). Количественная оценка экспериментальной ошибки необходима для корректной оценки статистической значимости полученных результатов. Стабильность результатов, полученных в ходе повторных экспериментов в центральной

точке, повышает достоверность прогностических возможностей разработанной модели.

Численное моделирование

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма численного моделирования трибологического поведения композита на основе ПТФЭ с использованием схемы трения скольжения «палец – диск» на базе конечно-элементного метода (КЭМ). Геометрическую модель узла «палец – диск» разрабатывали в среде SOLIDWORKS, а последующее конечно-элементное моделирование выполняли в программном комплексе ANSYS 2021 R2 Workbench. Для обеспечения адекватности модели и высокой достоверности прогнозируемых результатов в расчетную схему импортировали физико-механические свойства материалов соответствующих компонентов. В программной среде ANSYS Workbench кон-

Таблица 4

Table 4

Матрица эксперимента

Experimental matrix

Испытание № / Run	Нормальная нагрузка, Н / Normal Load (N)	Скорость трения скольжения, об/мин / Sliding Speed (rpm)	Температура, °C / Temperature (°C)
1	55	521	88
2	155	521	88
3	55	878	88
4	155	878	88
5	55	521	172
6	155	521	172
7	55	878	172
8	155	878	172
9	15	700	130
10	200	700	130
11	115	400	130
12	115	1000	130
13	115	700	60
14	115	700	200
15	115	700	130
16	115	700	130
17	115	700	130
18	115	700	130
19	115	700	130
20	115	700	130



Рис. 3. Блок-схема численного моделирования

Fig. 3. Flow chart of numerical simulation

тактному взаимодействию диска и образца назначали поведение с учетом трения и асимметрии контактного взаимодействия. Подвижность компонентов ограничивали путем наложения шарнирных связей, определяющих степени свободы [21].

Диск моделировался как абсолютно твердое тело, в то время как образец (палец) рассматривали как деформируемое тело для учета его деформации в процессе нагружения. Для образца (пальца) определяли возможность перемещения только в вертикальном направлении (translation joint, поступательное движение), в то время как для диска устанавливали вращательное движение. Метод обнаружения контакта был основан на определении нормали к целевой поверхности в узловой точке, что соответствовало направлению приложенной к образцу (пальцу) силы. Отключение функции обрезки контакта (trim contact) позволило использовать агрессивные обновления матрицы жесткости, что, в свою очередь, способствовало ускорению сходимости и сокращению времени численного моделирования. Генерацию конечно-элементной сетки выполняли с помощью автоматических инструментов построения сетки ANSYS Mechanical APDL. Для дискретизации трехмерной геометрии применяли комбинацию тетраэдрических и гексаэдрических конечных элементов. Тетраэдрические элементы обеспечивали адекватное представление сложных геометрических форм, в то время как гексаэдрические элементы использовали в областях с регулярной геометрией для повышения точности численного решения [22]. В рамках моделирования применяли модель износа Арчарда, а коэффициент износа (K) составлял $0,988 \cdot 10^{-4}$.

В соответствии с законом износа Арчарда скорость изнашивания определяли как линейную функцию приложенной нагрузки, скорости скольжения, твердости наиболее мягкого контактирующего материала и коэффициента износа. Следует отметить, что данная модель износа учитывает характеристики контактирующих поверхностей, однако не принимает во внимание влияние шероховатости поверхности и продолжительности работы. Для моделирования трибологической системы «палец – диск» с использованием конечно-элементного метода (КЭА) применяли программный комплекс ANSYS Workbench. Расчеты выполняли методом нестационарного структурного анализа с учетом физико-механических свойств материалов диска и образца (пальца). На начальном этапе проводили верификацию численной модели путем сопоставления результатов моделирования с данными экспериментальных исследований.

Степенная зависимость

В трибологии поведение материалов в различных условиях эксплуатации часто описывается степенной зависимостью, которая позволяет установить взаимосвязь между зависимыми параметрами (износ, коэффициент трения) и независимыми переменными (скорость скольжения, нагрузка, температура) для задач прогнозного анализа. Математически она может быть представлена следующим уравнением:

$$y = ax^k, \quad (1)$$

где x и y – независимая и зависимая переменные; a – коэффициент пропорциональности; k – показатель степени.

Установлено, что для адгезионного износа трибологическое поведение материалов описывается степенной зависимостью, характеризующейся высокой чувствительностью к изменениям параметров. Даже незначительное изменение параметра может оказать существенное влияние на зависимую переменную. Степенная зависимость позволяет установить связь между скоростью износа и различными эксплуатационными переменными, это делает ее полезным инструментом при проектировании компонентов с улучшенными характеристиками. Степенная зависимость представляет собой надежный подход к описанию процессов износа и трения, что обуславливает ее широкое применение в трибологии [24]. Использование степенной зависимости позволяет предотвратить преждевременный выход из строя трибологических элементов, разрабатывать материалы с повышенным ресурсом и оптимизировать условия эксплуатации. При этом следует учитывать ограничения данной модели и проводить проверку результатов моделирования с использованием эмпирических данных.

Результаты и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований износа применяли машину трения, схему «палец – диск» и фиксированный путь скольжения, равный 5 км. На рис. 4 представлены изображения дорожки износа и отпечаток дорожки на контртеле из нержавеющей стали SS 304.

Перед каждым экспериментом регистрировалась начальная масса образцов. Эксперименты проводились в соответствии с планом эксперимента (Design of Experiments, DoE). Потеря мас-



Рис. 4. Изображение дорожки износа, образованной образцами на диске из нержавеющей стали марки AISI 304

Fig. 4. Track image of pins on SS 304 steel disc

сы измерялась при различных нормальных нагрузках, скоростях скольжения и температурах. Потерю объема и удельную скорость изнашивания для каждого режима испытаний рассчитывали следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Потеря объема (мм}^3\text{)} &= \\ &= \frac{\text{Потеря массы (м)}}{\text{Плотность (м)}}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Удельная скорость изнашивания (мм}^3\text{/Н} \cdot \text{м)} &= \\ &= \frac{\text{Потеря объема (мм}^3\text{)}}{\text{Нагрузка (Н)} \times \text{Путь трения (м)}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты всех экспериментов представлены в табл. 5.

Для моделирования изнашивания применяли степенной закон, связывающий удельную скорость изнашивания с нормальной нагрузкой (Н) и скоростью скольжения (об/мин). Обычно степенной закон используется для понимания влияния нескольких входных параметров на выходной отклик. Расчет выполняли согласно уравнению

$$W = aL^b S^c T^d, \quad (4)$$

где W – удельная скорость изнашивания; L – нормальная нагрузка; S – скорость скольжения; T – температура; a , b , c и d – константы.

Значения этих констант определяли для материалов М1, М2 и М3 с использованием экспериментальных данных. С помощью программного обеспечения DataFit получали корреляцию между износом, нормальной нагрузкой, скоростью скольжения и температурой; эмпирическое уравнение для соответствующего материала приведено в табл. 6.

Большинство проведенных экспериментов показывает, что материал М2 демонстрирует лучшую износостойкость, характеризующуюся наименьшей потерей объема и удельной скоростью изнашивания. При нагрузке 2 Н и скорости 400 об/мин материал М2 имеет потерю объема 1,6042 мм³ с удельной скоростью изнашивания 9,3125E-06 мм³/Н·м по сравнению с потерей объема материала М1 (13,0605 мм³) и материала М3 (10,0141 мм³). Материал М2 работает лучше, чем материал М1 и М3, когда нагрузка и скорость увеличиваются. При нагрузке 25 Н и скорости 1000 об/мин материал М1 показыва-

Экспериментальные результаты для материалов M1, M2 и M3

Experimental results for material M1, M2 and M3

Испы- тание № / Run	M1		M2		M3	
	Потеря объема, мм ³ / Volume loss (mm ³)	Удельная скорость износа, мм ³ /Н·м / Specific wear rate (mm ³ /N·m)	Потеря объема, мм ³ / Volume loss (mm ³)	Удельная скорость износа, мм ³ /Н·м / Specific wear rate (mm ³ /N·m)	Потеря объема, мм ³ / Volume loss (mm ³)	Удельная скорость износа, мм ³ /Н·м / Specific wear rate (mm ³ /N·m)
1	13,0605	4,749E-05	1,6042	9,3125E-06	10,0141	3,641E-05
2	85,0757	1,098E-04	9,7269	2,0036E-05	53,2009	6,865E-05
3	24,7405	8,997E-05	2,8127	1,6328E-05	20,3713	7,408E-05
4	155,9154	2,012E-04	18,0080	3,7094E-05	109,5102	1,413E-04
5	16,3985	5,963E-05	1,9445	1,1288E-05	12,2503	4,455E-05
6	101,9721	1,316E-04	10,7772	2,2200E-05	64,0694	8,267E-05
7	26,6520	9,692E-05	3,1404	1,8230E-05	24,6040	8,947E-05
8	185,1592	2,389E-04	18,0080	3,7094E-05	123,9012	1,599E-04
9	2,2919	3,056E-05	0,4156	8,8462E-06	2,2741	3,032E-05
10	216,3670	2,164E-04	19,4754	3,1091E-05	128,4902	1,285E-04
11	35,4290	6,162E-05	4,2400	1,1772E-05	25,7003	4,470E-05
12	107,6915	1,873E-04	12,8762	3,5749E-05	78,6877	1,368E-04
13	55,6731	9,682E-05	6,5551	1,8199E-05	43,8375	7,624E-05
14	82,5310	1,435E-04	8,2850	2,3002E-05	59,2238	1,030E-04
15	70,8319	1,232E-04	8,1029	2,2496E-05	50,6657	8,811E-05
16	72,9259	1,268E-04	7,5111	2,0853E-05	50,0740	8,709E-05
17	68,1916	1,186E-04	6,6007	1,8326E-05	48,0710	8,360E-05
18	71,8334	1,249E-04	7,2835	2,0222E-05	50,2105	8,732E-05
19	70,3767	1,224E-04	7,7842	2,1612E-05	52,1680	9,073E-05
20	78,7527	1,370E-04	7,6477	2,1233E-05	49,4367	8,598E-05

Таблица 6

Table 6

Эмпирическое уравнение для каждого материала

Empirical equation for each material

Материал / Material	Уравнение / Equation
M1	$W = (2,74E - 10)L^{0,874}S^{1,155}T^{0,277}$
M2	$W = (1,02E - 10)L^{0,672}S^{1,231}T^{0,216}$
M3	$W = (3,58E - 10)L^{0,598}S^{0,598}T^{0,232}$

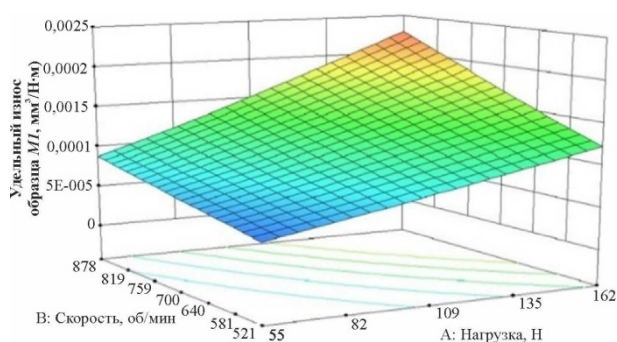
ет наибольшую потерю объема – 185,1592 мм³, за ним следует материал М3, который показывает потерю объема 123,9012 мм³. В то время как М2 показывает наименьшую потерю объема 18,0080 мм³ с удельной скоростью изнашивания 3,7094E-05 мм³/Н·м.

Согласованность результатов, полученных при повторных испытаниях в центральной точке плана (эксперименты 15–20), подтверждает воспроизводимость экспериментальной методики. Средняя удельная скорость изнашивания материала М2 в центральной точке составляет 2,108E-05 мм³/Н·м, что ниже, чем у материалов М1 (1,238E-04 мм³/Н·м) и М3 (8,814E-05 мм³/Н·м).

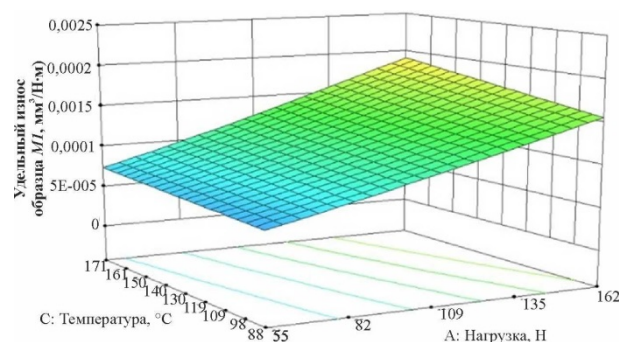
Полученные коэффициенты детерминации (R^2) равны 0,91, 0,96 и 0,93, это свидетельствует о том, что разработанные эмпирические модели (представленные в табл. 6) адекватно описывают скорость изнашивания материалов М1, М2 и М3 по нержавеющей стали SS 304 в исследованном диапазоне параметров. Анализ показателей степени в эмпирических уравнениях показывает,

что для материала М1 характерна практически линейная зависимость скорости изнашивания как от нагрузки, так и от температуры. В то же время скорость изнашивания материала М3 демонстрирует более сильную зависимость от скорости скольжения. Более высокая скорость изнашивания материала М1 при повышенных нагрузках и температурах ограничивает его применение в условиях высоких нагрузок. Материал М3 демонстрирует наименьшую стойкость к изнашиванию, что обусловлено высоким значением предэкспоненциального множителя, а также повышенными показателями степени для скорости скольжения и температуры. Материал М2 характеризуется меньшей чувствительностью к изменению нагрузки и температуры, а также умеренной чувствительностью к скорости скольжения, что обеспечивает его более высокую износостойкость в целом.

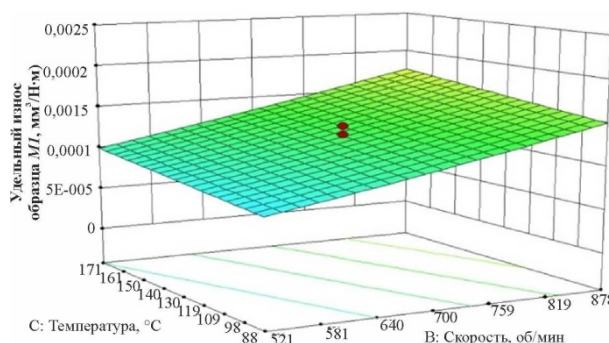
Для визуализации влияния исследуемых параметров на удельную скорость изнашивания на рис. 5–7 представлены трехмерные графики для материалов М1, М2 и М3 соответственно



а



б



в

Рис. 5. Удельная скорость изнашивания для материала М1:

а – зависимость от нормальной нагрузки и скорости скольжения; б – зависимость от нормальной нагрузки и температуры; в – зависимость от скорости скольжения и температуры

Fig. 5. Specific wear rate for M1 (a) normal load vs sliding speed, (б) normal load vs temperature and (в) sliding speed vs temperature

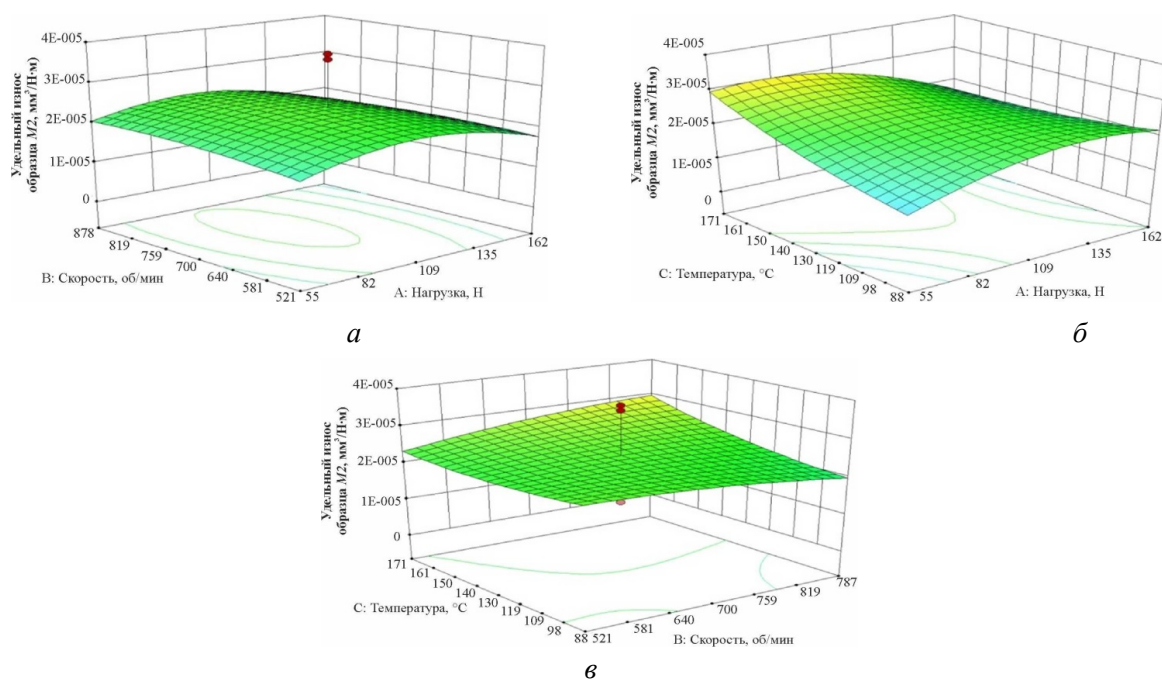


Рис. 6. Удельная скорость изнашивания для материала M2:

a – зависимость от нормальной нагрузки и скорости скольжения; *б* – зависимость от нормальной нагрузки и температуры; *в* – зависимость от скорости скольжения и температуры

Fig. 6. Specific wear rate for M2 (*a*) normal load vs sliding speed, (*б*) normal load vs temperature and (*в*) sliding speed vs temperature

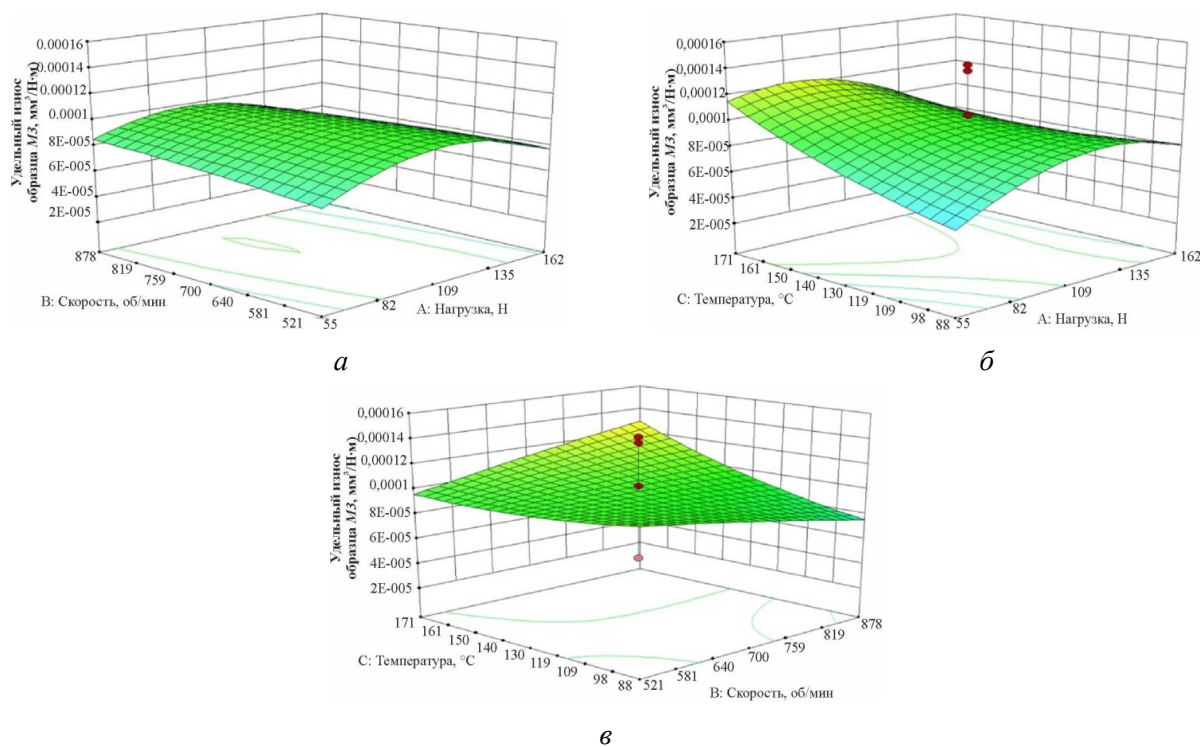


Рис. 7. Удельная скорость изнашивания для материала M3:

a – зависимость от нормальной нагрузки и скорости скольжения; *б* – зависимость от нормальной нагрузки и температуры; *в* – зависимость от скорости скольжения и температуры

Fig. 7. Specific wear rate for M3 (*a*) normal load vs sliding speed, (*б*) normal load vs temperature and (*в*) sliding speed vs temperature

(рис. 5, *а–в*, рис. 6, *а–в* и рис. 7, *а–в*). Анализ графика на рис. 5, *а* показывает, что удельная скорость изнашивания материала М1 проявляет выраженную зависимость от нагрузки и скорости скольжения. При этом крутизна изменения удельной скорости изнашивания в зависимости от нагрузки выше, чем в зависимости от скорости скольжения, что свидетельствует о доминирующем влиянии нагрузки на интенсивность изнашивания материала М1. Контуры на рис. 5, *б* указывают на более сильное влияние нагрузки, чем температуры, на удельную скорость изнашивания, что также подтверждает преобладающую роль нагрузки в определении износостойкости материала М1 в исследованных условиях. График на рис. 5, *в* демонстрирует более высокий градиент изменения скорости изнашивания вдоль оси скорости скольжения по сравнению с осью температуры, что свидетельствует о несколько большем влиянии скорости скольжения на характер изнашивания материала М1 по сравнению с температурой.

На рис. 6, *а–в* представлена зависимость износа материала М2 от нагрузки, температуры и скорости скольжения. При увеличении значений параметров возрастают сила трения и температура в зоне контакта, что приводит к деградации поверхности и, как следствие, к заметному увеличению износа. Повышенные температура и нагрузка ускоряют изнашивание материала за счет снижения сопротивления деформации, обусловленного размягчением материала матрицы, что также способствует увеличению скорости изнашивания. Кроме того, наблюдается тенденция к увеличению износа с ростом скорости скольжения, это связано с увеличением тепловыделения на взаимодействующих поверхностях. Данный эффект усиливается по мере дальнейшего повышения температуры.

Графики поверхности на рис. 7, *а–в* иллюстрируют поведение материала М3 в различных условиях эксплуатации. Отчетливо прослеживается нелинейный характер зависимости скорости изнашивания от исследуемых параметров. Повышенные нагрузки увеличивают напряжение в контактной области, приводя к более интенсивному изнашиванию даже при относительно низких скоростях скольжения и температурах. Увеличение скорости скольжения вызывает термическую деградацию материала, что

дополнительно ускоряет процесс изнашивания. Аналогично повышение температуры приводит к термическому размягчению материала, способствуя увеличению износа. Однако в умеренном диапазоне рабочих параметров скорость изнашивания остается относительно стабильной.

На рис. 8, *а* представлена зависимость удельной скорости изнашивания от нагрузки при постоянной температуре 130 °С и скорости 700 об/мин. Отмечается, что материал М1 демонстрирует недостаточную износостойкость и высокую чувствительность к контактному давлению, что проявляется в резком увеличении износа при повышенных нагрузках. В то же время более высокая устойчивость под нагрузкой материала М2 обеспечивает его эффективную работу в различных условиях нагружения. Аналогично материал М2 проявляет термическую стабильность, демонстрируя устойчивость к температурным колебаниям. В отличие от этого, материал М1 подвержен термическому размягчению и деградирует, показывая неудовлетворительные результаты при изменении температуры. Материал М2 также эффективно сохраняет свои свойства при изменении скорости скольжения. Следует отметить, что материал М3 демонстрирует умеренные показатели износа в различных рабочих условиях.

Для численного моделирования изнашивания использована модель Арчарда, интегрированная с конечно-элементным методом (КЭМ). При этом для определения инкрементального износа применен объемный датчик. Модель износа Арчарда определяет объем износа на основе контактной площади, общего пути скольжения и распределения напряжений, в то время как КЭМ оценивает потерю объема, учитывая поверхностные взаимодействия. Применение объемного датчика представляет собой более совершенный подход, позволяющий оценить объем износа с учетом локальных изменений параметров контакта, таких как коэффициент трения и твердость. Это повышает прогностическую способность моделирования.

На рис. 9, *а* представлена типичная схема трения «палец – диск», широко используемая для исследования поведения материалов при изнашивании в контролируемых условиях эксплуатации. Диск моделируется как абсолютно твердое тело, соединенное посредством вращательного

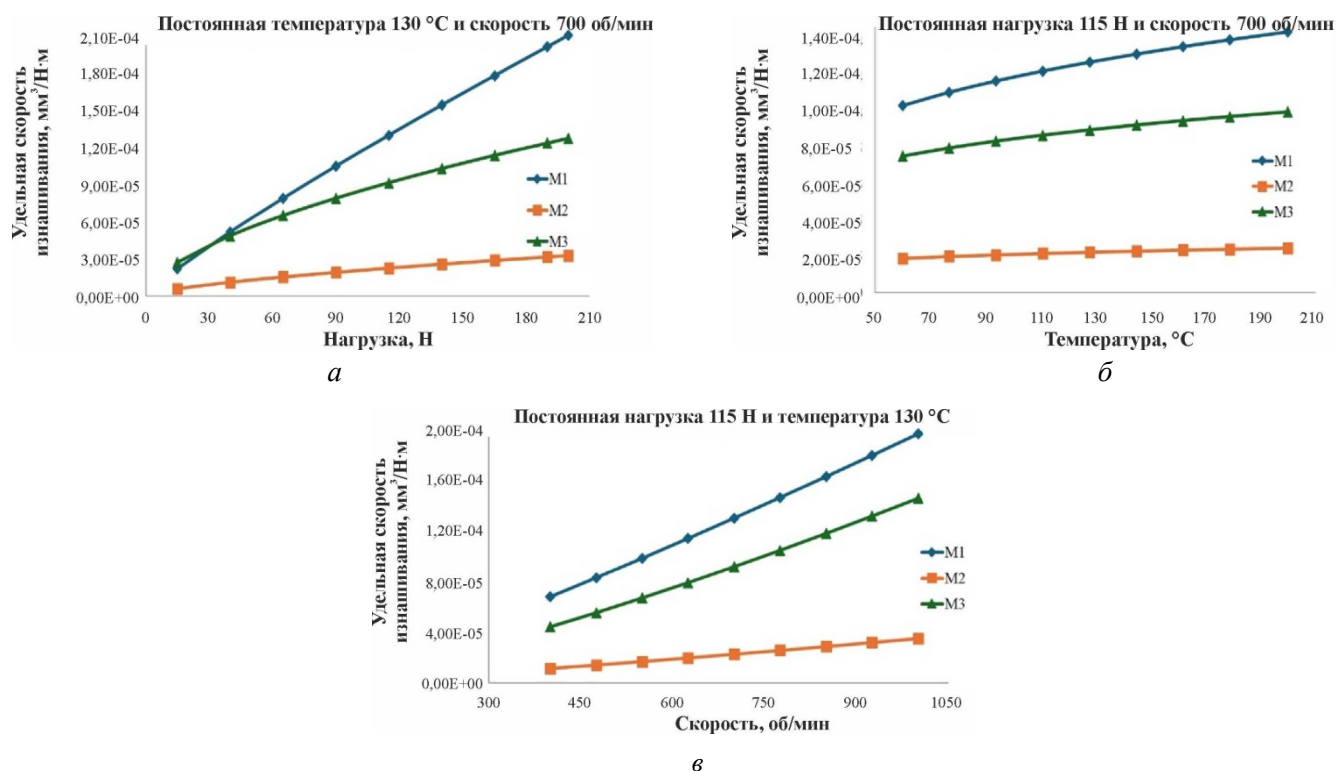


Рис. 8. Удельная скорость изнашивания:

а – при постоянной температуре 130 °C и скорости вращения 700 об/мин; б – при постоянной нагрузке 115 Н и скорости вращения 700 об/мин; в – при постоянной нагрузке 115 Н и температуре 130 °C

Fig. 8. Specific wear rate (а) constant temperature 130 °C and speed 700 rpm (б) constant load 115 N and speed 700 rpm and (в) constant load 115 N and temperature 130 °C

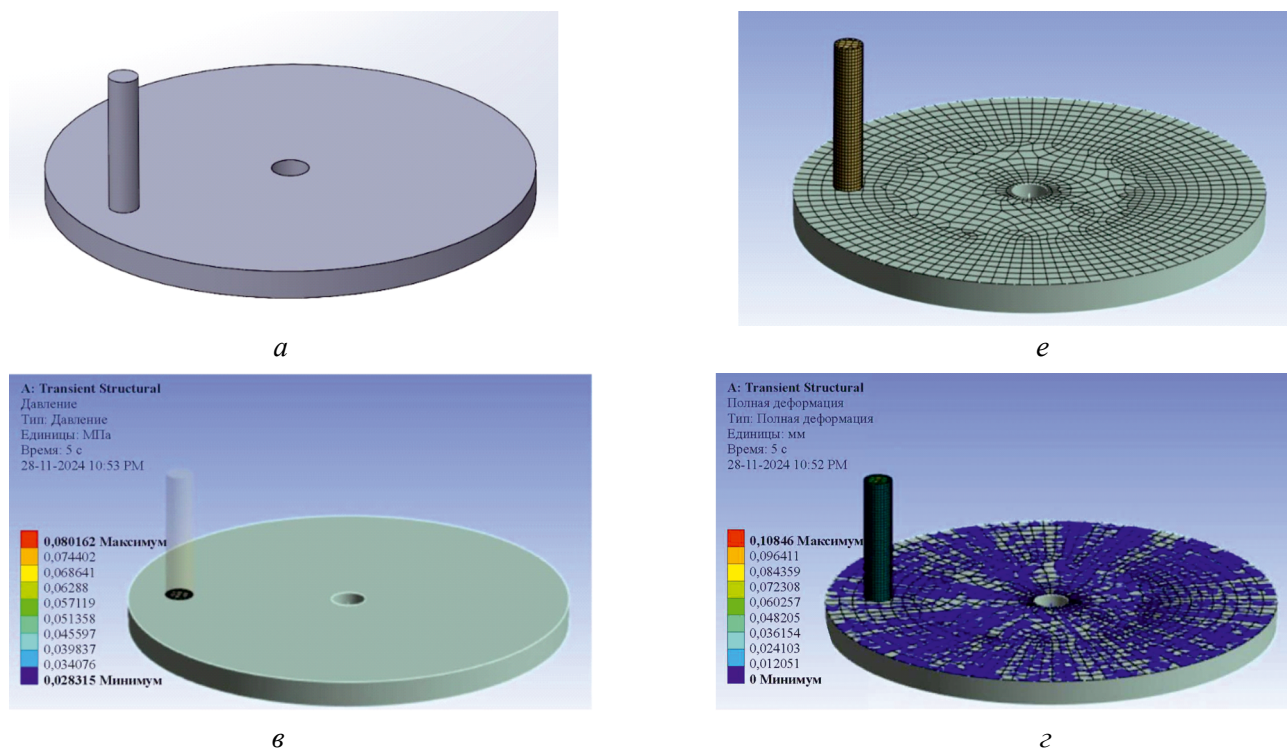


Рис. 9. Анализ методом конечных элементов (МКЭ):

а – моделирование; б – построение сетки; в – распределение давления; г – симуляция

Fig. 9. FEA analysis:

а – modelling; б – meshing; в – pressure distribution; г – simulation

шарнира, в то время как гибкий образец (палец) совершает поступательное движение в вертикальном направлении вдоль диска. На рис. 9, б показана детализированная сетка конечных элементов вблизи контактной зоны образца и диска, необходимая для точного определения деформаций и напряжений и обеспечения вычислительной точности модели. На рис. 9, в представлено распределение давления на диске, полученное в результате переходного структурного анализа. Отмечается, что нагрузка эффективно распределяется между образцом и диском в области контакта. На рис. 9, г показано, что поверхность образца подвергается значительной деформации в условиях концентрированной нагрузки.

Материал М1 демонстрирует умеренное соответствие между экспериментальными и численными результатами, как показано на рис. 10, а. Однако следует отметить, что при повышенных нагрузках наблюдается значительное расхождение результатов. На рис. 10, б показано, что для материала М2 наблюдается более тесное соответствие между экспериментальными данными

и результатами моделирования. При этом модель несколько переоценивает потерю объема по сравнению с экспериментальными данными, однако общая тенденция сохраняется. На рис. 10, в показано, что для материала М3 модель последовательно переоценивает потерю объема. На основании полученных результатов можно заключить, что материал М2 демонстрирует наилучшие результаты, поскольку предсказания модели наиболее точно соответствуют экспериментальным данным. Расхождение между результатами может быть обусловлено такими факторами, как неоднородность материала, состояние поверхности, а также внешние факторы окружающей среды, которые не были учтены в модели.

Выводы

В настоящей работе проведена оценка трибологических характеристик трех материалов – М1, М2 и М3 – в различных условиях эксплуатации с применением экспериментальных,

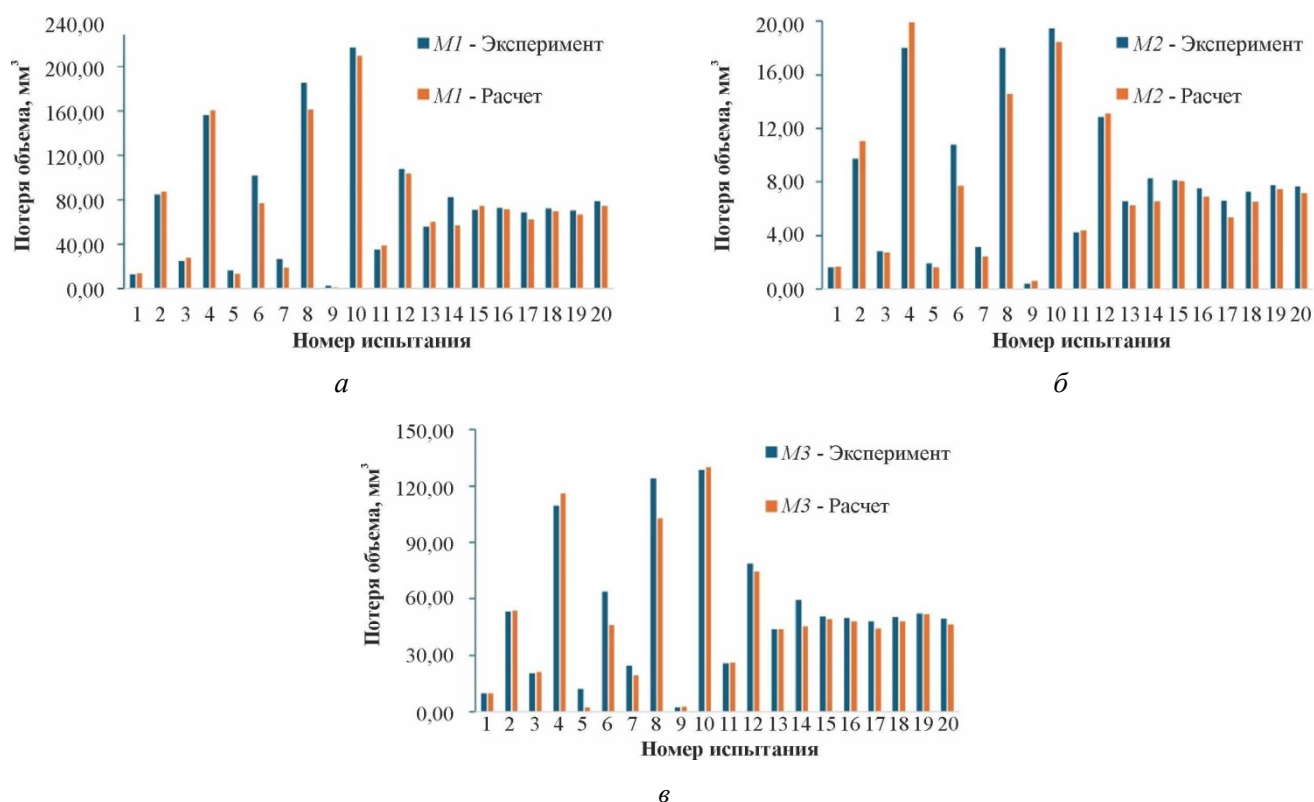


Рис. 10. Сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования:

а – материал М1; б – материал М2; в – материал М3

Fig. 10. Comparison between experimental and simulation results:

а – material М1; б – material М2; в – material М3

статистических и численных методов. Установлено, что материал М1 демонстрирует наибольшую скорость изнашивания при высоких нагрузках и температурах, в то время как М3 обладает умеренной износостойкостью. Материал М2 проявляет превосходную износостойкость, термическую стабильность и низкую чувствительность к изменению рабочих условий. Комбинирование экспериментального и численного подходов создает надежную основу для оценки и прогнозирования трибологического поведения композиционных материалов, позволяя преодолеть ограничения, связанные с временными и ресурсными затратами на проведение экспериментов, и обеспечивает возможность прогнозирования характеристик материалов с высокой точностью и надежностью. На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы.

1. Экспериментальные исследования и численное моделирование показали, что материал М2, представляющий собой ПТФЭ с 25%-м содержанием углерода, превосходит по износостойкости чистый ПТФЭ (М1) и ПТФЭ с 20%-м содержанием стекла (М3) в различных условиях эксплуатации. При высокой нагрузке (200 Н), скорости вращения (700 об/мин) и температуре (130 °С) удельная скорость изнашивания материала М2 составила всего $3,1091 \cdot 10^{-5}$ мм³/Н·м, что соответствует снижению износа на 93,6 % по сравнению с М1 и на 71 % по сравнению с М3.

2. Результаты численного моделирования с использованием модели износа Арчарда демонстрируют хорошее соответствие экспериментальным данным, особенно для материала М2, для которого расхождения не превышают 10 % в умеренных условиях. Для материала М3 наблюдается переоценка износа в диапазоне 10–15 %, в то время как материал М1 демонстрирует значительные расхождения с экспериментальными данными, что обусловлено его термическим размягчением при повышенных нагрузках и температурах. Это подчеркивает важность армирования материала для повышения его устойчивости к износу.

3. Материал М1, обладая наименьшей износостойкостью, проявляет высокую чувствительность к нагрузке и температуре, что связано с его низкой механической прочностью. Материал

М3 демонстрирует умеренные характеристики износа, однако его удельная скорость изнашивания значительно превышает аналогичный показатель для М2 в экстремальных условиях. Материал М2, характеризующийся превосходной устойчивостью под нагрузкой, термической стабильностью и стабильными характеристиками, является наиболее перспективным материалом для трибологических применений, связанных с высокими нагрузками. Оптимизация рабочих параметров, заключающаяся в поддержании нагрузки на уровне 160 Н, скорости скольжения 451 об/мин и температуры 130 °С, позволяет минимизировать износ и подтверждает эффективность эмпирических моделей для прогнозирования трибологического поведения материалов.

Список литературы

1. Rojacz H., Maierhofer D., Piringer G. Environmental impact evaluation of wear protection materials // *Wear*. – 2025. – Vol. 560–561. – P. 205612. – DOI: 10.1016/j.wear.2024.205612.
2. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry / K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, A. Erdemir // *Tribology International*. – 2017. – Vol. 115. – P. 116–139. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
3. Bhushan B., Wilcock D.F. Wear behavior of polymer compositions in dry reciprocating sliding // *Wear*. – 1982. – Vol. 75 (1). – P. 41–70. – DOI: 10.1016/0043-1648(82)90139-9.
4. Effect of fibrous filler on friction on wear of PTFE composite under dry and wet condition / H. Wang, X. Feng, Y. Shi, X. Lu // *China Particuology*. – 2007. – Vol. 5 (6). – P. 414–419. – DOI: 10.1016/j.cpart.2007.08.003.
5. Shangguan Q., Cheng X. Effect of rare earth on tribological properties of carbon fiber reinforced PTFE composites // *Journal of Rare Earths*. – 2007. – Vol. 25. – P. 469–473. – DOI: 10.1016/S1002-0721(07)60458-X.
6. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E.I. Sliding wear behavior of PTFE composites // *Wear*. – 2002. – Vol. 252 (5–6). – P. 361–369. – DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00859-6.
7. A review on wear prediction models of polymers / R. Mule, A. Deshpande, U. Verma, S. Gumaste, P. Kulkarni, J. Shah, A. Kulkarni // *Transactions on Innovations in Science & Technology*. – 2021. – Vol. 5 (2). – P. 278–282.
8. 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.

9. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2311. – P. 070030. – DOI: 10.1063/5.0035408.

10. Tevruz T. Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings // Wear. – 1999. – Vol. 230 (1). – P. 61–69. – DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00091-5.

11. Dry sliding wear behaviour of PTFE filled with glass and bronze particles / B.A. Mudasar Pasha, D. Abdul Budan, S. Basavarajappa, S. Manjunath Yadav, B.A. Nizamuddi // Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces. – 2011. – Vol. 5 (2). – P. 59–64. – DOI: 10.1179/1751584X11Y.0000000006.

12. Venkateswarlu G., Sharada R., Bhagvanth Rao M. Effect of fillers on mechanical properties of PTFE based composites // Archives of Applied Science Research. – 2015. – Vol. 7 (7). – P. 48–58.

13. Song F., Wang Q., Wang T. Effects of glass fiber and molybdenum disulfide on tribological behaviors and PV limit of chopped carbon fiber reinforced Polytetrafluoroethylene composites // Tribology International. – 2016. – Vol. 104. – P. 392–401. – DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.015.

14. Kolhe S., Deshpande A., Wangikar K. Wear behavior of Polytetrafluoroethylene composites: a review // Smart technologies for energy, environment and sustainable development. – Singapore: Springer, 2019. – P. 571–584. – DOI: 10.1007/978-981-13-6148-7_55.

15. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Characterization of glass hybrid composite: a review // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol. 4 (9). – P. 9627–9630. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.237.

16. Prediction of wear rate of glass-filled PTFE composites based on machine learning approaches / A.R. Deshpande, A.P. Kulkarni, N. Wasatkar, V. Gajalkar, M. Abdullah // Polymers. – 2024. – Vol. 16 (18). – P. 2666. – DOI: 10.3390/polym16182666.

17. Combined effects of fiber/matrix interface and water absorption on the tribological behaviors of wa-

ter lubricated-polytetrafluoroethylene-based composites reinforced with carbon and basalt fibers / J. Wang, B. Chen, N. Liu, G. Han, F. Yan // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2014. – Vol. 59. – P. 85–92. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.01.004.

18. Comparative study of tribological properties of different fibers reinforced PTFE/PEEK composites at elevated temperatures / L. Mu, X. Feng, J. Zhu, H. Wang, Q. Sun, Y. Shi, X. Lu // Tribology Transactions. – 2010. – Vol. 53 (2). – P. 189–194. – DOI: 10.1080/10402000903097460.

19. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene / F. Li, K. Hu, J. Li, B. Zhao // Wear. – 2001. – Vol. 249 (10–11). – P. 877–882. – DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00816-X.

20. Şahin Y. Analysis of abrasive wear behavior of PTFE composite using Taguchi's technique // Cogent Engineering. – 2015. – Vol. 2 (1). – P. 1–15. – DOI: 10.1080/23311916.2014.1000510.

21. Correction of Archard equation for wear behavior of modified pure titanium / A.T. Tabrizi, H. Aghajani, H. Saghafian, F.F. Laleh // Tribology International. – 2021. – Vol. 155. – P. 106772. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106772.

22. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O. Finite element based simulation of dry sliding wear // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2005. – Vol. 13. – P. 57–75. – DOI: 10.1088/0965-0393/13/1/005.

23. Mathematical modeling of various forces acting on piston rod packing rings / R. Nile, U. Verma, A. Deshpande, S. Joshi, J. Shah, A. Kulkarni // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 49 (5). – P. 1521–1526. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.304.

24. Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г. Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.

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



Integrated numerical and experimental investigation of tribological performance of PTFE based composite material

Abhijeet Deshpande^{1, a, *}, Atul Kulkarni^{2, b}, Prashant Anerao^{2, c},
 Leena Deshpande^{1, d}, Avinash Somatkar^{1, e}

¹ Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Maharashtra, Pune - 411048, India

² Vishwakarma Institute of Technology, Pune, Maharashtra, 411037, India

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8956-3093>,  abhijeet.deshpande@viit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, atul.kulkarni@vit.edu;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0353-7420>,  prashant.anerao@vit.edu; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7426-2028>,  leena.deshpande@viit.ac.in;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>,  avinash.somatkar@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 January 2025

Revised: 17 February 2025

Accepted: 27 March 2025

Available online: 15 June 2025

Keywords:

Green manufacturing

Composite and sustainability

FEA

Glass

Carbon

PTFE

Wear behavior

ABSTRACT

Introduction. One of the most significant phenomena in every industrial sector is friction and wear, which inevitably occurs when there is relative motion between similar or dissimilar materials. A substantial portion of global energy production is estimated to be expended in overcoming friction and wear, making them critical factors in energy efficiency and sustainability. Recently, advances in materials science, lubrication technologies, and innovative design approaches have facilitated a significant reduction in friction and wear, leading to considerable energy savings and extended component lifespan. Polytetrafluoroethylene (PTFE), among other materials, has revolutionized the tribological field, emerging as a highly effective synthetic polymer. This is attributed to its exceptional properties, including a low coefficient of friction, chemical inertness, thermal stability, non-stick characteristics, and biocompatibility. These unique properties make PTFE an ideal material for various industrial applications, spanning from aerospace to biomedical sectors. **The purpose of work.** This study aims to conduct a comprehensive numerical and experimental investigation into the tribological properties of PTFE-based composites. The materials selected for investigation include pure PTFE, PTFE with 25% carbon (C) filler, and PTFE with 20% glass filler. Testing was performed using stainless steel (SS 304) as the counterbody. Tribological testing and subsequent evaluation were conducted under dry sliding friction conditions, considering key parameters such as load, sliding speed, and temperature. Response surface methodology (RSM) was employed to develop an empirical model, utilizing experimental data to predict the wear resistance of these materials. Empirical models were developed to understand the influence of process parameters on wear behavior and to optimize operating conditions for minimizing material loss. **Method of investigation.** Archard's wear model was used as the theoretical framework for predicting volume loss and specific wear rate based on numerical simulations. The wear coefficient (K) was determined through experimental testing and used as an input parameter in the numerical models. Numerical simulations were developed using the finite element analysis (FEA) software ANSYS, enabling the simulation of complex tribological interactions between the composite materials and the counterbody. A central composite rotatable design (CCRD) within the framework of RSM was used to structure the experiments. The experiments were conducted under dry sliding friction conditions using pin on disc tribometer. The input parameters for the experiments were load (ranging from 15 N to 200 N), sliding speed (ranging from 400 rpm to 1000 rpm), and temperature (ranging from 60 °C to 200 °C). Each experiment was conducted for a sliding distance of 5 km to ensure sufficient wear for analysis. A total of 20 experiments were performed for each material, providing a comprehensive dataset for statistical analysis and model validation. **Result and discussion.** The results of the study highlight the effectiveness of numerical simulation in predicting the wear resistance of PTFE-based composites under dry sliding friction conditions. Experimental investigations reveal that pure PTFE exhibits low mechanical strength, leading to a high wear rate, whereas PTFE with carbon and glass fillers demonstrates improved wear resistance characteristics. The addition of carbon to PTFE enhances the composite's performance by forming a stable transfer film on the counterbody, while the addition of glass promotes increased hardness and, consequently, reduced material loss. Empirical models developed using response surface methodology (RSM) confirm that the applied load on the pin is the most significant parameter affecting wear, followed by sliding speed and temperature. Numerical simulations based on Archard's wear model exhibit good agreement with experimental data, validating the accuracy of the numerical simulations. This research contributes to a deeper understanding of the application of PTFE-based composites in extending the service life and enhancing the reliability of industrial products.

For citation: Deshpande A., Kulkarni A.P., Anerao P., Deshpande L., Somatkar A. Integrated numerical and experimental investigation of tribological performance of PTFE based composite material. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 219–237. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-219-237. (In Russian).

Kulkarni Atul P., Professor

Vishwakarma Institute of Technology,

Pune, Maharashtra, 411037, India

Tel.: (+91) 9922914460, e-mail: atul.kulkarni@vit.edu

References

1. Rojacz H., Maierhofer D., Piringer G. Environmental impact evaluation of wear protection materials. *Wear*, 2025, vol. 560–561, p. 205612. DOI: 10.1016/j.wear.2024.205612.
2. Holmberg K., Kivikytö-Reponen P., Härkisaari P., Valtonen K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 116–139. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
3. Bhushan B., Wilcock D.F. Wear behavior of polymer compositions in dry reciprocating sliding. *Wear*, 1982, vol. 75 (1), pp. 41–70. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90139-9.
4. Wang H., Feng X., Shi Y., Lu X. Effect of fibrous filler on friction on wear of PTFE composite under dry and wet condition. *China Particuology*, 2007, vol. 5 (6), pp. 414–419. DOI: 10.1016/j.cpart.2007.08.003.
5. Shanguan Q., Cheng X. Effect of rare earth on tribological properties of carbon fiber reinforced PTFE composites. *Journal of Rare Earths*, 2007, vol. 25, pp. 469–473. DOI: 10.1016/S1002-0721(07)60458-X.
6. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E.I. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, 2002, vol. 252 (5–6), pp. 361–369. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00859-6.
7. Mule R., Deshpande A., Verma U., Gumaste S., Kulkarni P., Shah J., Kulkarni A. A review on wear prediction models of polymers. *Transactions on Innovations in Science & Technology*, 2021, vol. 5 (2), pp. 278–282.
8. 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.
9. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311, p. 070030. DOI: 10.1063/5.0035408.
10. Tevruz T. Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings. *Wear*, 1999, vol. 230 (1), pp. 61–69. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00091-5.
11. Mudasar Pasha B.A., Abdul Budan D., Basavarajappa S., Manjunath Yadav S., Nizamuddin B.A. Dry sliding wear behaviour of PTFE filled with glass and bronze particles. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*, 2011 vol. 5 (2), pp. 59–64. DOI: 10.1179/1751584X11Y.0000000006.
12. Venkateswarlu G., Sharada R., Bhagvanth Rao M. Effect of fillers on mechanical properties of PTFE based composites. *Archives of Applied Science Research*, 2015, vol. 7 (7), pp. 48–58.
13. Song F., Wang Q., Wang T. Effects of glass fiber and molybdenum disulfide on tribological behaviors and PV limit of chopped carbon fiber reinforced Polytetrafluoroethylene composites. *Tribology International*, 2016, vol. 104, pp. 392–401. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.015.
14. Kolhe S., Deshpande A., Wangikar K. Wear behavior of Polytetrafluoroethylene composites: a review. *Smart technologies for energy, environment and sustainable development*. Singapore, Springer, 2019, pp. 571–584. DOI: 10.1007/978-981-13-6148-7_55.
15. Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Characterization of glass hybrid composite: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4 (9), pp. 9627–9630. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.237.
16. Deshpande A.R., Kulkarni A.P., Wasatkar N., Gajalkar V., Abdullah M. Prediction of wear rate of glass-filled PTFE composites based on machine learning approaches. *Polymers*, 2024, vol. 16 (18), pp. 2666. DOI: 10.3390/polym16182666.
17. Wang J., Chen B., Liu N., Han G., Yan F. Combined effects of fiber/matrix interface and water absorption on the tribological behaviors of water lubricated-polytetrafluoroethylene-based composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 59, pp. 85–92. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.01.004.
18. Mu L., Feng X., Zhu J., Wang H., Sun Q., Shi Y., Lu X. Comparative study of tribological properties of different fibers reinforced PTFE/PEEK composites at elevated temperatures. *Tribology Transactions*, 2010, vol. 53 (2), pp. 189–194. DOI: 10.1080/10402000903097460.
19. Li F., Hu K., Li J., Zhao B. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene. *Wear*, 2001, vol. 249 (10–11), pp. 877–882. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00816-X.
20. Şahin Y. Analysis of abrasive wear behavior of PTFE composite using Taguchi's technique. *Cogent Engineering*, 2015, vol. 2 (1), pp. 1–15. DOI: 10.1080/23311916.2014.1000510.
21. Tabrizi A.T., Aghajani H., Saghafian H., Laleh F.F. Correction of Archard equation for wear behavior of modified pure titanium. *Tribology International*, 2021, vol. 155, p. 106772. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106772.

22. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O. Finite element based simulation of dry sliding wear. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, vol. 13, pp. 57–75. DOI: 10.1088/0965-0393/13/1/005.

23. Nile R., Verma U., Deshpande A., Joshi S., Shah J., Kulkarni A. Mathematical modeling of various forces acting on piston rod packing rings. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 49 (5), pp. 1521–1526. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.304.

24. Kulkarni A.P., Chinchani S., Sargade V.G. Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23 (4), pp. 47–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.

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>).