



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Моделирование характеристик износа при скольжении композиционного материала на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), армированного углеродным волокном, в паре трения с SS304 (12X18H10T)

Сатиш Чинчаникар *

Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуна - 411039, Махараштра, Индия

<https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchaniкар@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 14 июля 2022
 Рецензирование: 26 июля 2022
 Принята к печати: 27 июля 2021
 Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

ПТФЭ
 Износ
 Искусственная нейронная сеть
 Стержень-диск
 SS304

АННОТАЦИЯ

Введение. В последнее десятилетие композиционные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) все чаще используются в качестве альтернативных материалов в автомобилестроении. ПТФЭ характеризуется низким коэффициентом трения, более высокой твердостью и коррозионной стойкостью. Однако этот материал имеет высокую скорость износа. Группа исследователей попыталась повысить износостойкость ПТФЭ, армировав его различными наполнителями. **Цель работы.** В данной работе экспериментально исследованы характеристики износа при сухом скольжении композиционного материала на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью SS304. Кроме того, с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) разработаны экспериментальные математические модели и модели для прогнозирования удельной скорости изнашивания с учетом влияния давления, скорости скольжения и температуры поверхности. **Методы исследования.** Эксперименты по сухому скольжению проводились на машине для испытания на износ типа «стержень-диск» с изменением нормальной нагрузки на штифт, скорости вращения диска и температуры поверхности. Эксперименты по исследованию влияния входных параметров на удельную скорость изнашивания в широком диапазоне проектных пространств планировались системно. Всего было проведено пятнадцать экспериментов на 5-километровой дистанции без повторения эксперимента с центральным бегом. Скорости скольжения получали подбором диаметра дорожки на диске и соответствующей скорости вращения диска. Для ИНС-модели был использован алгоритм машинного обучения с обратным распространением с прямой связью. **Результаты и обсуждение.** Это исследование показало лучшую точность прогнозирования благодаря архитектуре ИНС, имеющей два скрытых слоя со 150 нейронами на каждом. Исследование выявило увеличение удельной скорости изнашивания при нормальной нагрузке, скорости скольжения и температуре поверхности. Однако это увеличение более заметно при более высоких параметрах процесса. Нормальная нагрузка и скорость скольжения наиболее существенно влияют на удельную скорость изнашивания. Значения удельной скорости изнашивания, полученные в результате расчета по разработанным моделям, хорошо согласуются с экспериментальными значениями со средней погрешностью, близкой к 10 %. Это показывает, что модель может быть использована для получения скорости износа композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью SS304. Проведенное исследование имеет задел для дальнейших исследований, рассматривающих влияние различных архитектур ИНС, различного количества нейронов и скрытых слоев на точность прогнозирования скорости износа.

Для цитирования: 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.

Введение

Трибологическое поведение скользящих контактных поверхностей оказывает заметное влияние на потери мощности, тепловыделение и общую производительность системы. Иссле-

дователи предприняли несколько попыток заменить обычный материал композитным, более легким и экономичным, подходящим для конкретного применения. В последнее десятилетие композиционные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) все чаще используются в качестве альтернативных материалов в автомобилестроении.

ПТФЭ, более известный как *Тефлон*, наиболее предпочтителен в качестве альтернативного

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, Ph.D. (Engineering), Professor
 Институт информационных технологий Вишвакармы,
 Кондва (Бадрек), Пуна - 411039, Махараштра, Индия
 Тел.: 91-2026950441, e-mail: satish.chinchaniкар@viit.ac.in

материала при наличии скользящего контакта. ПТФЭ характеризуется низким коэффициентом трения, твердостью и коррозионной стойкостью. Однако этот материал имеет высокую скорость износа. Группа исследователей предприняла попытку повысить износостойкость ПТФЭ путем армирования его различными наполнителями, учитывая его широкий спектр применения в автомобилестроении, в узлах, имеющих скользящий контакт [1-5].

Sonawane и др. [1] наблюдали лучшие показатели износа при трении скольжения ПТФЭ, упрочненного 35 % углеродного волокна, по сравнению с ПТФЭ, упрочненным 25 % углеродного волокна, в паре с контртелом из сплава Al6061. Сталь *AISI 304* – аустенитная нержавеющая сталь наиболее часто используемая в быту, автомобилестроении и промышленности. При рассмотрении композиционного материала на основе ПТФЭ в качестве альтернативного материала для применения в автомобилестроении *Chinchanikar* и др. [2] измерили характеристики сухого износа при скольжении композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью *AISI 304*. В их исследовании наблюдалось явление пленки переноса на контртело с увеличением давления на поверхностях скольжения, что способствовало снижению удельной скорости изнашивания. Однако необходимы дальнейшие исследования развития пленки переноса на поверхности скольжения с учетом влияния нормальной нагрузки, скорости скольжения и температуры.

Unal и др. [3] исследовали износ ПТФЭ, ПТФЭ + 17 % стекловолокна, ПТФЭ + 25 % бронзы, ПТФЭ + 35 % углеродного волокна. Их исследование показало снижение коэффициента трения для ПТФЭ и композитов до определенной нормальной нагрузки, после которой трение и скорость износа возрастали. В их исследовании наблюдалось образование тонкой и однородной пленки переноса в случае ПТФЭ и разрыв пленки переноса в случае композита с бронзой и углеродным волокном.

Sachin [4] исследовал износостойкость ПТФЭ и композитов на его основе, со стекло- и углеродным волокном в качестве наполнителя. В их исследовании наблюдалось увеличение потери объема с увеличением нагрузки и рас-

стояния. Однако потеря объема уменьшалась с увеличением размера абразива, что сочли доминирующим фактором износостойкости материалов. Их исследование показало, что композиты с углеродным наполнителем обладают большей износостойкостью, чем *PTFE*-матрица, армированная стекловолокном.

Venkateswarlu et al. [5] исследовали механические свойства, такие как твердость, временное сопротивление разрушению при растяжении и относительное удлинение чистого ПТФЭ и различных композитов на его основе с различной концентрацией наполнителя. В их исследовании наблюдалось увеличение твердости при оптимальном содержании наполнителя, а при увеличении концентрации наполнителя значения твердости снижались. С другой стороны, временное сопротивление разрушению при растяжении и относительное удлинение ПТФЭ-композитов уменьшались с увеличением содержания наполнителя. Их исследование показало, что бронза является многообещающим наполнителем для получения более высокого временного сопротивления разрушению и меньшего удлинения.

Экспериментальное исследование *Wang* и др. [6] показало, что единичные включения коротких углеродных волокон и графита значительно снижают трение в случае композитов на основе *PI* (полиимид) и их сопротивление износу. *Song* и др. в работе [7] исследовали влияние добавок стекловолокна и дисульфида молибдена (MoS_2) на износ и трение ПТФЭ-композита с рубленым углеродным волокном в качестве наполнителя при массовой доле углеродного волокна 20 %. Их исследование показало увеличение коэффициента трения с изменением скорости скольжения и его уменьшение от нагрузки при использовании стального кольца в качестве контртела. Добавление MoS_2 в ПТФЭ-композит повысило его устойчивость к царапинам и, следовательно, помогло снизить скорость износа.

В экспериментальных исследованиях *Gujrathi* и др. [8] также наблюдалось снижение скорости изнашивания за счет добавления наполнителей. Их исследование показало, что образование защитного слоя между стержнем и контртелом помогает уменьшить потерю объема из-за износа. *Shen* и др. в работе [9] исследовали трибологические характеристики ПТФЭ-композитов с частицами SiO_2 и эпоксидных смол. Их исследование

показало, что при добавлении 10...15 % ПТФЭ наблюдается наименьший коэффициент трения и скорость износа в условиях сухого скольжения при использовании шариков из подшипниковой стали в качестве контртела. В другом исследовании *Shen* и др. [10] сравнили сопротивление истиранию ПТФЭ с частицами Al_2O_3 размером от 5 до 200 мкм. Их исследование показало, что размер абразива существенно влияет на трибологические характеристики трибопар.

Sawyer и др. [11] наблюдали увеличение износостойкости композита из ПТФЭ, армированного частицами оксида алюминия размером 40 нм, с увеличением концентрации наполнителя. Исследование *Kim* и др. [12] выявило снижение коэффициентов трения при нормальной нагрузке и скорости скольжения. Наблюдается уменьшение скорости износа с увеличением нормальной нагрузки. Однако первоначально скорость износа увеличивалась со скоростью скольжения, а затем уменьшалась.

Wang и др. [13] исследовали износостойкость текстурированной нержавеющей стали в паре с полимерными поверхностями. EDX-анализ, проведенный ими, показал различное поведение при износе. *Desale* и *Pawar* [14] исследовали характеристики износа и трения твердого смазочного материала *PTFE*, армированного углеродом, MoS_2 , стекловолокном, полиэфирэфиркетонными частицами в условиях сухого и мокрого трения в паре с нержавеющей сталью *SS304*. Они наблюдали минимальную скорость износа для ПТФЭ-композита, с 15 % стекловолокна и 5 % частиц MoS_2 .

Модель искусственной нейронной сети (ИНС) рассматривалась как потенциальный и хороший инструмент для математического моделирования сложных и нелинейных характеристик износа [15]. Подход ИНС, связанный с биологической нервной системой, моделирует многие сложные нелинейные и другие взаимосвязи реальной жизни. *Ibrahim* и др. [15] разработали модель ИНС для определения износа ПТФЭ-композитов. Кроме того, производительность моделей сравнивалась с обычной моделью мультилинейной регрессии (МЛР). Их исследование показало, что модель ИНС обладает более высокой точностью прогнозирования. Сенситивный анализ показал, что объемная доля армирующего наполнителя, расстояние скольжения и

плотность композитов являются важными параметрами.

ИНС помогают обеспечить точность моделирования нелинейных зависимостей свойств композитных материалов, и в дальнейшем помогает оценить влияние многих входных параметров на характеристики материала. Группа исследователей обнаружила, что ИНС очень точно моделируют механическое поведение композитных материалов [16]. Исследователи приложили достаточные усилия для моделирования характеристик износа при скольжении с использованием ИНС. Группа исследователей заметила, что производительность модели ИНС зависит от количества и типа данных, предоставленных во время обучения. Кроме того, сообщается, что необходимо определить значительный набор параметров, чтобы сэкономить время и эффективно обучить модель ИНС [17]. Моделирование ИНС помогает понять физику процесса, что улучшает производительность процесса за счет лучшего управления им.

Хотя исследователями было проведено достаточно работ для оценки характеристик армированных композитов, очень немногие моделировали характеристики износа при скольжении ПТФЭ-композита, армированного углеродным волокном, в паре с нержавеющей сталью *SS304*. С этой целью в этом исследовании разрабатываются экспериментальные математические модели и модели ИНС для прогнозирования характеристик износа при скольжении ПТФЭ-композита, армированного углеродным волокном, в паре с нержавеющей сталью *SS304* с учетом воздействия нормальной нагрузки, температуры поверхности и скорости скольжения.

Методика исследований

Угленаполненный ПТФЭ обладает превосходными фрикционными, механическими свойствами и износостойкостью. Во время производства углерод может быть добавлен в виде порошка или волокна. Процесс горячего компрессионного формования используется для изготовления стержня из ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 % масс.). Используемые образцы композиционного материала имели диаметр и длину 10 и 40 мм соответственно.

Цилиндрические стержни были дополнительно обработаны, чтобы иметь индивидуальную длину 31 мм с учетом положения нагреваемого держателя стержней, в котором устанавливаются испытуемые образцы (стержни). В качестве материала дисков, имеющих наружный диаметр 165 мм и толщину 8 мм, были использованы пластины из нержавеющей стали SS304, изготовленные в трех комплектах. Все пластины были закалены до твердости 60 HRC и обработаны для получения почти одинаковой шероховатости поверхности 1,6 мкм.

Для проведения экспериментов по сухому скольжению использовалась машина типа «стержень-диск» (рис. 1). Эта машина имеет возможность варьировать скорость в диапазоне 200...2000 об/мин и нормальную нагрузку в диапазоне 20...200 Н. Машина оснащена нагревателем для изучения влияния температуры поверхности раздела на характеристики износа поверхностей скольжения. Для получения сведений о температуре стержней используется термопара. Эта машина также имеет возможность проводить испытания на износ с учетом воздействия смазки.

Цилиндрические стержни, используемые в качестве образцов для испытаний, различались по размеру и имели диаметр 3, 6, 8 и 10 мм. Для каждого размера стержня требовался отдельный тип держателя. Этот держатель устанавливался на штоке с качающимся механизмом. Вес груза, закрепленного на другом конце штока, передавался на цилиндрический стержень и,

следовательно, на пластину (диск) через стальную проволоку. Сила трения и линейный износ (в микрометрах) измерялись датчиками, которыми оснащена машина. Датчик присутствия, которым оборудован станок, помогает измерять скорость диска (об/мин) с наименьшим количеством 1 об/мин с точностью 1 %.

В общем в процессе сжатия давление на поршневое кольцо изменялось в диапазоне от 2 до 25 бар, а температура – в диапазоне 50...200 °С при скорости скольжения 5 м/с. Исходя из этого были выбраны диапазоны нормальной нагрузки, температуры поверхности раздела и скорости скольжения, которые показаны в табл. 1. Были систематически спланированы эксперименты для исследования влияния входных параметров на удельную скорость изнашивания с более широким диапазоном расчетного пространства. Всего было проведено пятнадцать экспериментов на 5-километровой дистанции без повторения эксперимента с центральным пробегом. Скорости скольжения получали подбором диаметра дорожки на диске и соответствующим вращением диска.

Результаты и обсуждение

Характеристики износа при скольжении в условиях сухого трения ПТФЭ композита (материал стержня) по пластине из нержавеющей стали SS304 (материал диска) определяли на машине типа «стержень-диск». Эксперименты проводили в соответствии с DoE, нормальная нагрузка, температура поверхности раздела и скорость скольжения варьировали в диапазонах, указанных в табл. 1.

На станке типа «стержень-диск» к стержню прикладывалась нормальная нагрузка путем перемещения (качающегося расположения) грузов, закрепленных на другом конце штока. Соответствующая температура устанавливалась включением нагревателя, а достигнутая температура измерялась термопарой. Требуемая скорость скольжения была получена за счет выбора соответствующего диаметра дорожки на диске и выбора соответствующей скорости вращения диска. Тест проводился на дистанции 5 км (около 14...17 мин). Цифровые показания износа, силы трения, соответствующие параметрам процесса, таким, как нормальная нагрузка, температура

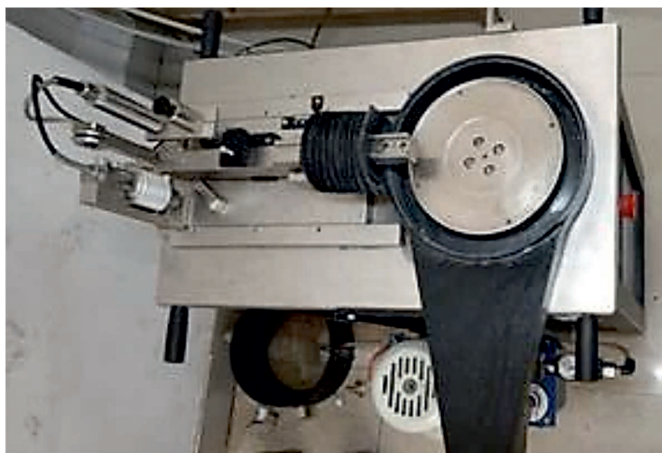


Рис. 1. Машина типа «стержень-диск», показывающая расположение диска

Fig. 1. A pin-on-disk machine showing disk arrangement

Таблица 1

Table 1

Уровни параметров, выбранные для оценки удельной скорости изнашивания

Levels of parameters selected to evaluate specific wear rate

Параметр / Parameter	Низкий уровень / Low level	Средний уровень / Moderate level	Высокий уровень / High level
Нормальная нагрузка (F_N) (Н)/ Normal load (F_N) (N)	20	100	180
Температура на границе раздела (T) ($^{\circ}\text{C}$) / Interface temperature (T) ($^{\circ}\text{C}$)	50	100	150
Скорость скольжения (v) (м/с)/ Sliding velocity (v) (m/s)	2	5	8
Длина пути: 5 км / Track distance: 5 km			

и скорость вращения диска, контролировались с панели управления. Панель управления была подключена к настольному компьютеру. Изменение силы трения и износа в зависимости от времени прохождения пути в 5 км также контролировалось на настольном компьютере с помощью программного обеспечения *Windcom*.

Матрица эксперимента с параметрами процесса, такими, как нормальная нагрузка, температура поверхности раздела и скорость скольжения, а также соответствующие результаты показаны в табл. 2. Теоретически скорость износа рассчитывается по уравнению

$$\begin{aligned} \text{удельная скорость изнашивания} = \\ = \frac{\text{потеря объема}}{\text{нагрузка} \times \text{путь трения}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Однако потерю объема получают путем измерения потери массы штифта до и после испытания. Потеря объема рассчитывается с помощью уравнения:

$$\text{потеря объема} = \frac{\text{потеря массы}}{\text{плотность}}. \quad (2)$$

Основанная на экспериментальных данных математическая модель, как показано в уравнении

$$\begin{aligned} \text{удельная скорость изнашивания } (W_s) = \\ = k F_N^a T^b v^c, \end{aligned} \quad (3)$$

разработана для прогнозирования скорости износа с точки зрения нормальной нагрузки (F_N),

температуры поверхности раздела (T) и скорости скольжения (v). Разработанная модель также полезна для понимания влияния параметров на износ. В уравнении (3): k , a , b и c – константы, полученные путем разработки модели полиномиальной регрессии на основе экспериментальных данных.

Программное обеспечение *DataFit* использовалось для получения корреляции между износом, нормальной нагрузкой, температурой и скоростью скольжения, выраженной в уравнении

$$\begin{aligned} \text{удельная скорость изнашивания } (W_s) = \\ = 9,89 \cdot 10^{-8} F_N^{0,6307} \times \\ \times T^{0,333} v^{0,403}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученный коэффициент корреляции (значение R^2), равный 0,9791, показал, что разработанное эмпирическое выражение может быть эффективно использовано для определения скорости изнашивания композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью *SS304* в области выбранных в этом исследовании параметров.

Из показателей нормальной нагрузки, температуры поверхности раздела и скорости видно, что на удельную скорость изнашивания существенно влияет нормальная нагрузка, а затем скорость скольжения и температура. Чтобы иметь четкое представление о влиянии входных параметров на удельную скорость изнашивания,

Таблица 2

Table 2

Матрица эксперимента и результаты
Experimental matrix and results

Номер экспери- мента п/п/ Expt. No.	F_N (Н)/ F_N (N)	T (°C)/ T (°C)	v (м/с)/ v (m/s)	Масса (г)/ Weight (gm)		Потеря массы (г)/ Weight loss (gm)	Потеря объема (мм ³)/ Volume loss (mm ³)	Удельная скорость изна- шивания ($\times 10^{-5}$) (мм ³ /Нм)/ Specific wear rate ($\times 10^{-5}$) (mm ³ /Nm)
				Перед испы- танием/ Before test	После испы- тания/ After test			
1	50	70	7	5,191	5,185	0,006	2,65	1,06
2	100	100	5	5,223	5,207	0,016	7,75	1,55
3	50	130	7	5,251	5,244	0,007	3,15	1,26
4	150	130	3	5,196	5,168	0,028	13,275	1,77
5	100	50	5	5,134	5,122	0,012	5,9	1,18
6	180	100	5	5,061	5,017	0,044	20,97	2,33
7	150	130	7	5,172	5,130	0,042	19,875	2,65
8	100	100	2	5,211	5,200	0,011	5,2	1,04
9	20	100	5	5,183	5,181	0,002	0,77	0,77
10	150	70	7	5,214	5,181	0,033	15,675	2,09
11	100	100	8	5,252	5,232	0,020	9,4	1,88
12	150	70	3	5,211	5,185	0,026	12,525	1,67
13	100	150	5	5,133	5,114	0,019	9,05	1,81
14	50	130	3	5,183	5,178	0,005	2,35	0,94
15	50	70	3	5,221	5,217	0,004	1,725	0,69

зависящую от нормальной нагрузки, температу-
ры поверхности раздела и скорости скольжения,
для удельной скорости изнашивания построены
трехмерные графики с использованием эмпи-
рического уравнения (4). Трехмерные кривые
поверхности строятся путем одновременного
изменения двух параметров процесса, при этом
третий параметр остается постоянным и имеет
среднее значение из диапазона параметров, как
показано в табл. 1.

Трехмерные графики, отражающие изме-
нение удельной скорости износа, показаны на
рис. 2, а–в. На рис. 2, а показано изменение ско-
рости износа при нормальной нагрузке и тем-
пературе на границе раздела с учетом скорости
скольжения 5 м/с. На рис. 2, б показано изме-
нение скорости износа в зависимости от ско-
рости скольжения и нормальной нагрузки, а на
рис. 2, в – изменение температуры поверхности
раздела и скорости скольжения. Графики постро-

ены на основании варьирования двух параметров
процесса при сохранении постоянного значения
третьего параметров ($F_N = 100$ Н, $T = 100$ °С
и $v = 5$ м/с). Это исследование показало влияние
взаимодействия параметров процесса на ско-
рость изнашивания композита на основе ПТФЭ
в паре трения с нержавеющей сталью SS304.

Очевидно, что удельная скорость изнашива-
ния увеличивается с увеличением нормальной
нагрузки, температуры поверхности раздела
и скорости скольжения. Однако увеличение
удельной скорости изнашивания станет более
заметным при более высоких параметрах про-
цесса. Нормальную нагрузку, скорость скольже-
ния и температуру поверхности раздела можно
рассматривать как наиболее важные параметры,
влияющие на скорость изнашивания. Это также
может быть подтверждено более высоким зна-
чением нормальной нагрузки, за которой сле-
дует скорость скольжения, а затем температура

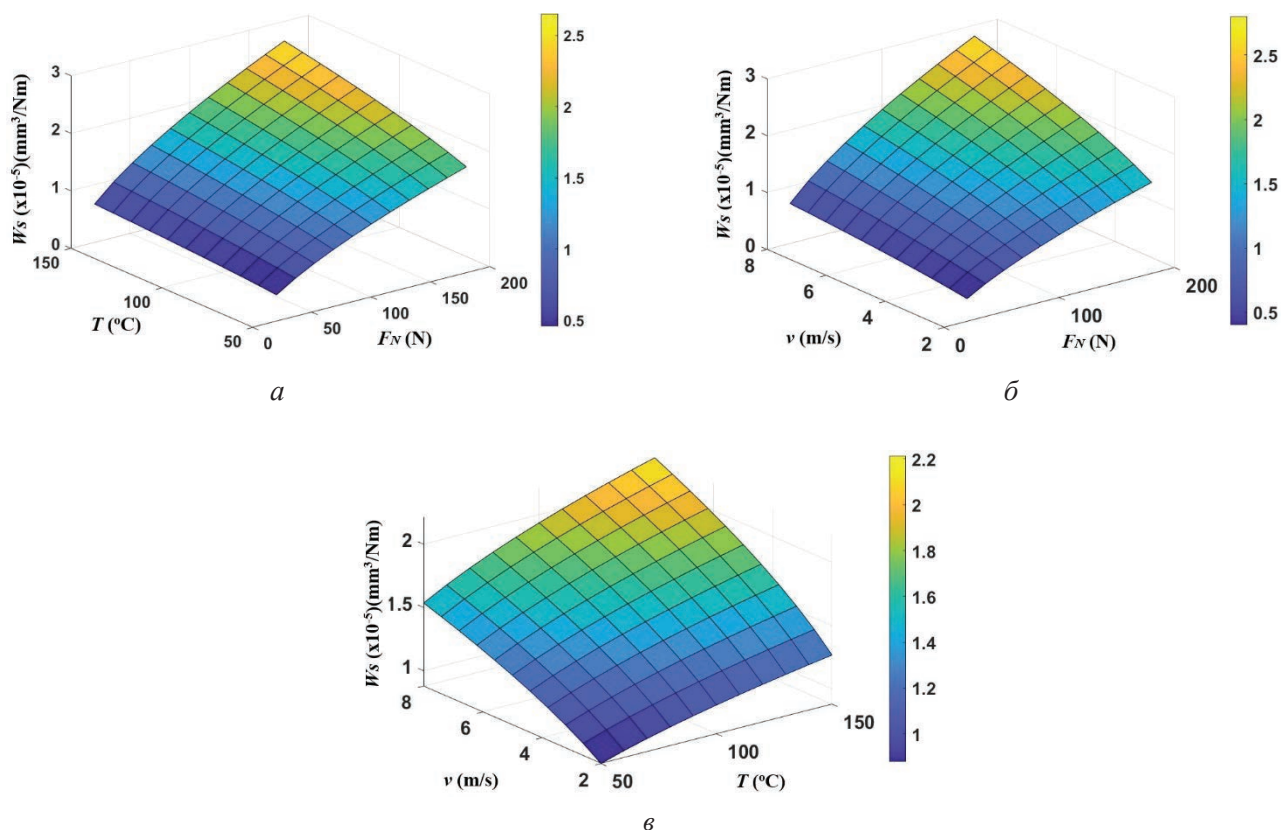


Рис. 2. Трехмерные графики, показывающие изменение удельной скорости изнашивания в зависимости от нормальной нагрузки и температуры поверхности раздела (*a*); нормальной нагрузки и скорости скольжения (*б*) и температуры поверхности раздела и скорости скольжения (*в*)

Fig. 2. 3-D plots showing specific wear rate varying with *a* – Normal load and interface temperature; *б* – Normal load and sliding speed, and *в* – Interface temperature and sliding speed

поверхности раздела в уравнении (4). Это исследование показало, что на изнашивание сильно влияет нормальная нагрузка, особенно при более высоких значениях температуры поверхности раздела и скорости скольжения.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это методика вычислений, которая может моделировать отношения между входными параметрами и откликами на выходе. Типичная архитектура *MLP*, которая чаще всего используется, показана на рис. 3. *MLP* характеризуется тремя различными уровнями, а именно входным слоем, скрытым слоем и выходным слоем, которые состоят из взаимосвязанной группы искусственных нейронов. Количество нейронов, присутствующих во входном и выходном слоях, равно количеству входных переменных и соответствующих выходных значений.

Для прогнозирования выходных данных с более высокой точностью необходимо обучение разработанной сети. В процессе обучения

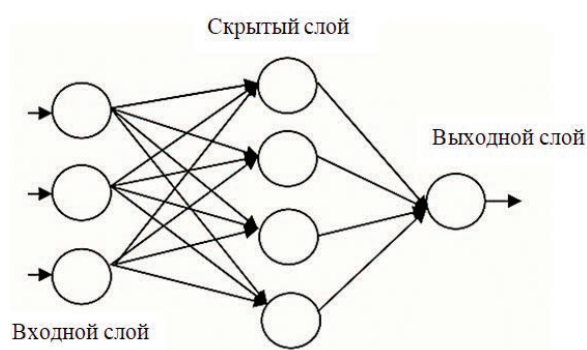


Рис. 3. Типичная архитектура ИНС

Fig. 3. Typical ANN architecture

модели синаптические веса сети упорядоченно изменяются для достижения желаемого результата. Наиболее часто используемым алгоритмом обучения является алгоритм обратного распространения погрешности. Для типичного алгоритма ИНС на первом этапе инициализируются веса и пороги. Затем выходные данные каждого нейрона вычисляются на основе входных данных и инициализированных весов, что приво-

дит к окончательному прогнозу вывода сети. Затем вычисляется погрешность в выходном узле и на основе ошибки модифицируются веса. Веса в предыдущих слоях модифицируются ошибками обратного распространения, вычисляемыми в узлах выходного слоя [18]. Этот процесс повторяется для набора входных и выходных обучающих данных. Обучение останавливается, когда выход ИНС достаточно близок к ожидаемому результату для каждого набора.

Для получения данных об изнашивании построена модель ИНС с использованием *MATLAB Toolbox* с учетом входных параметров, таких как нормальная нагрузка, температура на границе раздела и скорость скольжения. Архитектура ИНС имеет три уровня, а именно входной, выходной и скрытый (рис. 4). Входной слой имеет три нейрона, выходной слой имеет один нейрон и соответствующее количество нейронов на скрытом слое. Нейроны выбираются путем проверки точности сети. Количество нейронов на скрытом слое можно изменить, если после обучения сеть работает плохо.

Нейронная сеть с прямой связью сопоставляет набор числовых входных данных с набором числовых целей. Приложение *Neural Fitting* из *MATLAB Toolbox* помогает выбрать данные, а также создать и обучить сеть и оценить ее производительность с использованием среднеквадратичной погрешности и регрессионного анализа. Выбрана двухслойная сеть с прямой связью, скрытыми сигмовидными нейронами и линейными выходными нейронами, которая хорошо подходит для многомерных задач при наличии непротиворечивых данных и достаточного количества нейронов в скрытом слое. Сеть была обучена алгоритму обратного распространения Левенберга–Марквардта.

В нейронной сети для обучения и проверки тестовых данных используются три вида выборок. В настоящей работе для обучения нейронной сети используется около 70 % данных. Сеть настраивается в соответствии со своей погрешностью. Около 15 % данных используется для проверки результатов, предсказанных обученной нейронной сетью. Эти наборы проверочных данных используются для измерения обобщения сети и для остановки обучения, когда обобщение перестает улучшаться, и около 15 % данных используются для проверки результатов, предсказанных нейронной сетью. Эти наборы данных не влияют на обучение и, таким образом, обеспечивают независимую оценку качества работы сети во время и после обучения.

Следующим важным шагом является определение архитектуры сети для получения более точных прогнозируемых результатов. В этом исследовании самая высокая предсказуемая точность 0,9747 наблюдалась с восемью нейронами в скрытом слое. Кроме того, сеть должна быть обучена с использованием либо алгоритма Левенберга–Марквардта, либо байесовской регуляризации, либо алгоритма масштабированного сопряженного градиента. Однако исследователи в основном использовали алгоритм Левенберга–Марквардта. Этот алгоритм сравнительно быстрее, чем другие алгоритмы. Однако этот алгоритм требует больше памяти.

Производительность обучения нейронной сети измеряется среднеквадратичной погрешностью (среднеквадратичная погрешность между исходными объектами и выходными данными). Более низкие значения являются предпочтительными. Значения регрессии (R) измеряют корреляцию между выходными данными (прогнози-

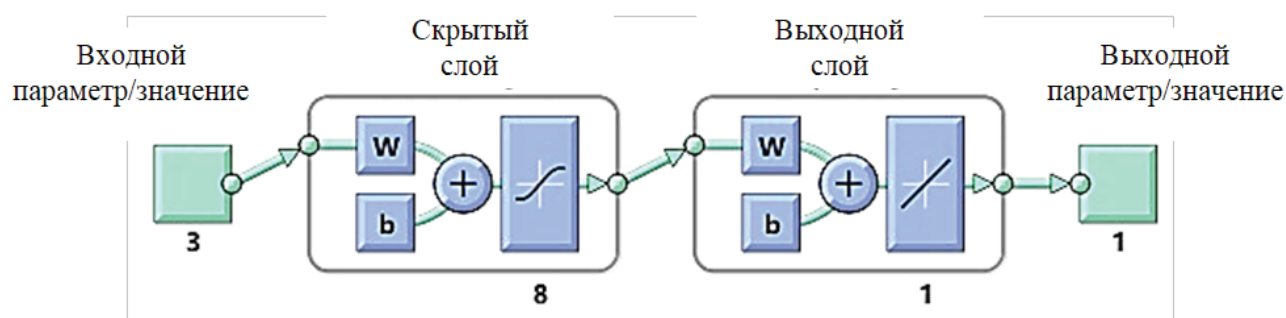


Рис. 4. Архитектура ИНС для получения данных о скорости изнашивания

Fig. 4. ANN architecture to obtain wear rate

руемыми значениями) и исходными объектами (входными данными), рис. 5, а, б, в и г соответственно.

Бликие к единице значения коэффициентов регрессии для обучения, подтверждения данных, тестирования и для всего набора данных показывают, что разработанная нейросетевая модель может быть надежно использована для прогнозирования скорости износа композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 масс.%), в паре трения с нержавеющей сталью SS304 в пределах параметров, выбранных в данном исследовании.

Кроме того, были проведены проверочные эксперименты с применением параметров процесса, отличных от тех, которые были использо-

ваны для разработки моделей. Сравнение прогнозируемых результатов с экспериментальной математической моделью и искусственной нейронной сетью (ИНС) показано в табл. 3. Точность модели оценивается путем получения процента погрешности между прогнозируемыми и экспериментальными значениями скорости изнашивания при различных параметрах процесса. Процент погрешности получали с использованием уравнения

средняя погрешность =

$$= \frac{\text{предсказанное значение} - \text{экспериментальное значение}}{\text{экспериментальное значение}} \times 100. \quad (5)$$

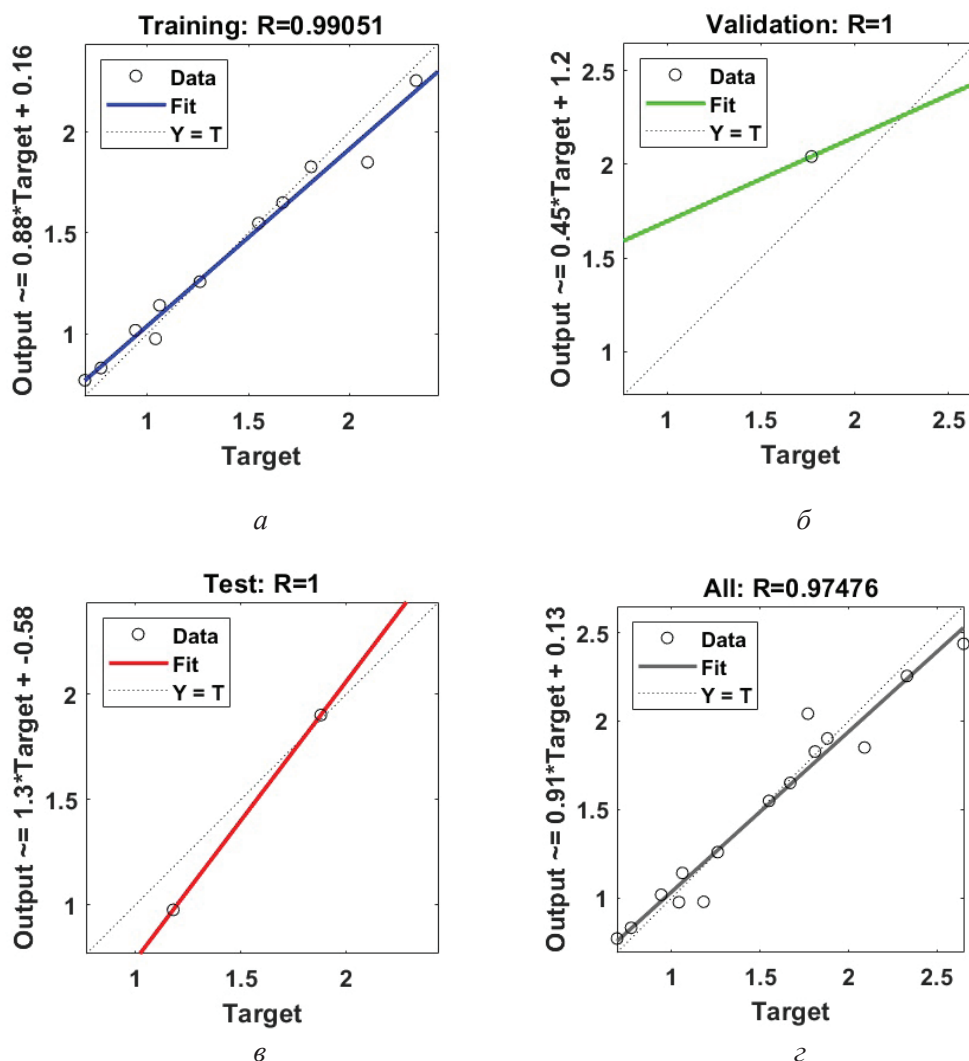


Рис. 5. Нейронная сеть:

а – обучение; б – подтверждение; в – тестирование; г – весь набор данных

Fig. 5. Neural network:

а – Training; б – Validation; в – Test; г – All data set

Проверочные эксперименты и результаты моделирования
Validation experiments and modeling results

Номер экспери- мента п/п / Expt. no.	F_N (Н) / F_N (N)	T (°C) / T (°C)	v (м/с) / v (m/s)	Удельная скорость изнашивания ($\times 10^{-5}$) (Ws) (мм ³ /Нм) / Specific wear rate ($\times 10^{-5}$) (Ws) (mm ³ /Nm)			% Погрешность / % Error	
				Экспе- римен- тальное значение / Expt. value	Стати- ческая модель / Statistical model	ИНС модель / ANN model	Стати- ческая модель / Statistical model	ИНС модель / ANN model
1	130	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	5,06	1,72
2	90	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97	19,16	4,97
3	40	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	15,33	5,04
4	140	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	7,72	1,29
5	170	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	7,61	3,24
6	70	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	6,10	5,13
Средняя погрешность							10,16	3,57

В табл. 3 представлены данные по удельной скорости изнашивания, предсказанные разработанными моделями. Прогнозируемые результаты хорошо согласуются с экспериментальными значениями со средней погрешностью 10,16 % для экспериментальной модели и 3,57 % для модели ИНС. Очевидно, что результаты, предсказанные моделью ИНС, лучше согласуются с экспериментальными результатами по сравнению с экспериментальной моделью.

Закключение

В этом исследовании была предпринята попытка моделирования характеристик изнашивания при скольжении композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью SS304. Были проведены эксперименты по схеме «стержень-диск» при различных нормальных нагрузках, температуре поверхности раздела и скоростях скольжения. Были разработаны экспериментальная математическая модель и модель ИНС для прогнозирования удельной скорости изнашивания и понимания параметрического влияния на удельную скорость изнашивания.

Из настоящего исследования можно сделать следующие выводы.

- Было замечено, что скорость изнашивания растет при увеличении нормальной нагрузки, температуры поверхности раздела и скорости скольжения. Однако рост скорости был более заметным при более высоких параметрах процесса. Нормальная нагрузка, скорость скольжения и температура поверхности раздела были признаны наиболее важными параметрами, влияющими на скорость износа. Это также подтверждается более высоким значением нормальной нагрузки, за которой следует скорость скольжения, а затем температура поверхности раздела.

- Коэффициент корреляции, равный 0,97, полученный как для разработанной экспериментальной математической модели, так и модели ИНС, показывает, что модель может быть надежно использована для определения скорости изнашивания композита на основе ПТФЭ, армированного углеродным волокном (35 мас.%), в паре трения с нержавеющей сталью SS304.

- Предсказанные разработанными моделями показатели удельной скорости изнашивания хорошо согласуются с экспериментальными значениями со средней погрешностью, близкой

к 10 %. Однако результаты, предсказанные моделью ИНС, в большей степени совпадают (средняя погрешность 3,57 %) с экспериментальными результатами, чем результаты, полученные с использованием статистической модели (средняя погрешность 10,16 %).

Список литературы

1. Dry sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against Aluminium 6061 alloy / A. Sonawane, A. Deshpande, S. Chinchani, Y. Munde // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – P. 3888–3893. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.929.
2. Chinchani S., Barade A., Deshpande A. Sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against AISI 304 stainless steel counterface // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1034. – P. 51–60. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1034.51.
3. Sliding friction and wear behavior of PTFE and its composite under dry sliding conditions / H. Unal, A. Mimarolu, U. Kadioglu, H. Ekiz // *Materials and Design*. – 2004. – Vol. 25. – P. 239–245. – DOI: 10.1016/j.matdes.2003.10.009.
4. Sahin Y. Analysis of abrasive wear behavior of PTFE composite using Taugh's technique // *Cogent Engineering*. – 2015. – Vol. 2, N 1. – P. 1–15. – DOI: 10.1080/23311916.2014.1000510.
5. Venkateswarlu G., Sharada R., Rao M.B. Effect of fillers on mechanical properties of PTFE based composites // *Archives of Applied Science Research*. – 2015. – Vol. 7, N 7. – P. 48–58.
6. Wang Q., Zhang X., Pei X. Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites // *Materials and Design*. – 2010. – Vol. 31, N 8. – P. 3761–3768. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.017.
7. Song F., Wang Q., Wang T. Effect of glass fiber and MoS₂ on tribological behaviour and PV limit of chopped carbon fiber reinforced PTFE composite // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 104. – P. 392–401. – DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.015.
8. Gujrathi S.M., Dhamande L.S., Patare P.M. Wear studies on polytetrafluoroethylene (PTFE) composites: Taguchi approach // *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*. – 2013. – Vol. 3, N 2. – P. 47–51. – DOI: 10.9756/BIJEMS.4406.
9. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO₂ particles / J.T. Shen, M. Top, Y.T. Pei, M. Hosson // *Wear*. – 2015. – Vol. 322–323, N 15. – P. 171–180. – DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.015.
10. Abrasive wear behavior of PTFE for seal applications under abrasive-atmosphere sliding condition / M. Shen, B. Li, Z. Zhang, L. Zhao // *Friction*. – 2020. – Vol. 8. – P. 755–767. – DOI: 10.1007/s40544-019-0301-7.
11. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles / W.G. Sawyer, K.D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L.S. Schadler // *Wear*. – 2003. – Vol. 254. – P. 573–580. – DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00252-7.
12. Kim D.W., Kim K.W. Effects of sliding velocity and normal load on friction and wear characteristics of multi-layered diamond-like carbon (DLC) coating prepared by reactive sputtering // *Wear*. – 2003. – Vol. 297, N 1–2. – P. 722–730. – DOI: 10.1016/j.wear.2012.10.009.
13. Wang M., Zhang C., Wang X. The wear behavior of textured steel sliding against polymers // *Materials*. – 2017. – Vol. 10, N 330. – P. 1–14. – DOI: 10.3390/ma10040330.
14. Desale D.D., Pawar H.B. Performance analysis of Polytetrafluoroethylene as journal bearing material // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 414–419. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.060.
15. Specific wear rate modeling of polytetrafluoroethylene composites via artificial neural network (ANN) and adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) tools / M.A. Ibrahim, Y. Şahin, A. Ibrahim, A.Y. Gidado, M.N. Yahya // *Virtual Assistant*. – IntechOpen, 2021. – DOI: 10.5772/intechopen.95242.
16. Paturi U.M., Cheruku S., Reddy N.S. The role of artificial neural networks in prediction of mechanical and tribological properties of composites – A comprehensive review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2022. – Vol. 29. – P. 1–41. – DOI: 10.1007/s11831-021-09691-7.
17. Artificial neural network algorithms for 3D printing / M.A. Mahmood, A.I. Visan, C. Ristoscu, I.N. Mihailescu // *Materials*. – 2020. – Vol. 14, N 1. – P. 163. – DOI: 10.3390/ma14010163.
18. Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G. Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks // *Composite Structures*. – 2010. – Vol. 92, N 12. – P. 2817–2829. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science



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



Modeling of sliding wear characteristics of Polytetrafluoroethylene (PTFE) composite reinforced with carbon fiber against SS304

Satish Chinchani^{*}

Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune - 411039, Maharashtra, India

 <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 July 2022

Revised: 26 July 2022

Accepted: 27 July 2022

Available online: 15 September 2022

Keywords:

PTFE

Wear

Artificial neural network

Pin-on-disk

SS304

ABSTRACT

Introduction. Over the last decade, composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) have been increasingly used as alternative materials for automotive applications. PTFE is characterized by a low coefficient of friction, hardness and corrosion resistance. However, this material has a high wear rate. A group of researchers attempted to improve the wear resistance of PTFE material by reinforcing it with different fillers. **The purpose of the work:** This study experimentally investigates the dry sliding wear characteristics of a PTFE composite reinforced with carbon fiber (35 wt.%) compared to SS304 stainless steel. In addition, experimental mathematical and ANN models are developed to predict the specific wear rate, taking into account the influence of pressure, sliding speed, and interface temperature. **The methods of investigation.** Dry sliding experiments were performed on a pin-on-disk wear testing machine with varying the normal load on the pin, disk rotation, and interface temperature. Experiments were planned systematically to investigate the effect of input parameters on specific wear rates with a wide range of design space. In total, fifteen experiments were carried out at a 5-kilometer distance without repeating the central run experiment. Sliding velocities were obtained by selecting the track diameter on the disk and corresponding rotation of the disk. A feedforward back-propagation machine learning algorithm was used to the ANN model. **Results and Discussion.** This study finds better prediction accuracy with the ANN architecture having two hidden layers with 150 neurons on each layer. This study finds an increase in specific wear rates with normal load, sliding velocity, and interface temperature. However, the increase is more prominent at higher process parameters. The normal load followed by sliding velocity most significantly affects the specific wear rate. The results predicted by the developed models for specific wear rates are in good agreement with the experimental values with an average error close to 10%. This shows that the model could be reliably used to obtain the wear rate of PTFE composite reinforced with carbon fiber (35 wt.%) compared to SS304 stainless steel. This study finds scope for further studies considering the effect of varying ANN architectures, different amount of neurons, and hidden layers on the prediction accuracy of the wear rate.

For citation: Chinchani 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. (In Russian).

References

1. Sonawane A., Deshpande A., Chinchani S., Munde Y. Dry sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against Aluminium 6061 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 3888–3893. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.929.
2. Chinchani S., Barade A., Deshpande A. Sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against AISI 304 stainless steel counterface. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1034, 51–60. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1034.51.
3. Unal H., Mimarolu A., Kadioglu U., Ekiz H. Sliding friction and wear behavior of PTFE and its composite under dry sliding conditions. *Materials and Design*, 2004, vol. 25, pp. 239–245. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.10.009.

* Corresponding author

Chinchani Satish, Ph.D. (Engineering), Professor

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Pune - 411039, Maharashtra, India

Tel.: 91-2026950441, e-mail: satish.chinchani@viit.ac.in

4. Sahin Y. Analysis of abrasive wear behavior of PTFE composite using Taughhi's technique. *Cogent Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1080/23311916.2014.1000510.
5. Venkateswarlu G., Sharada R., Rao M.B. Effect of fillers on mechanical properties of PTFE based composites. *Archives of Applied Science Research*, 2015, vol. 7, no. 7, pp. 48–58.
6. Wang Q., Zhang X., Pei X. Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, no. 8, pp. 3761–3768. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.017.
7. Song F., Wang Q., Wang T. Effect of glass fiber and MoS₂ on tribological behaviour and PV limit of chopped carbon fiber reinforced PTFE composite. *Tribology International*, 2016, vol. 104, pp. 392–401. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.015.
8. Gujrathi S.M., Dhamande L.S., Patore P.M. Wear studies on polytetrafluoroethylene (PTFE) composites: Taguchi approach. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 47–51. DOI: 10.9756/BIJEMS.4406.
9. Shen J.T., Top M., Pei Y.T., Hosson M. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO₂ particles. *Wear*, 2015, vol. 322–323, no. 15, pp. 171–180. DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.015.
10. Shen M., Li B., Zhang Z., Zhao L. Abrasive wear behavior of PTFE for seal applications under abrasive-atmosphere sliding condition. *Friction*, 2020, vol. 8, pp. 755–767. DOI: 10.1007/s40544-019-0301-7.
11. Sawyer W.G., Freudenberg K.D., Bhimaraj P., Schadler L.S. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear*, 2003, vol. 254, pp. 573–580. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00252-7.
12. Kim D.W., Kim K.W. Effects of sliding velocity and normal load on friction and wear characteristics of multi-layered diamond-like carbon (DLC) coating prepared by reactive sputtering. *Wear*, 20013, vol. 297, no. 1–2, pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.wear.2012.10.009.
13. Wang M., Zhang C., Wang X. The wear behavior of textured steel sliding against polymers. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 330, pp. 1–14. DOI: 10.3390/ma10040330.
14. Desale D.D., Pawar H.B. Performance analysis of Polytetrafluoroethylene as journal bearing material. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 414–419. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.060
15. Ibrahim M.A., Şahin Y., Ibrahim A., Gidado A.Y., Yahya M.N. Specific wear rate modeling of polytetrafluoroethylene composites via artificial neural network (ANN) and adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) tools. *Virtual Assistant*, IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95242.
16. Paturi U.M., Cheruku S., Reddy N.S. The role of artificial neural networks in prediction of mechanical and tribological properties of composites – A comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, vol. 29, pp. 1–41. DOI: 10.1007/s11831-021-09691-7.
17. Mahmood M.A., Visan A.I., Ristoscu C., Mihailescu I.N. Artificial neural network algorithms for 3D printing. *Materials*, 2020, vol. 14, no. 1, p. 163. DOI: 10.3390/ma14010163.
18. Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G. Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, no. 12, pp. 2817–2829. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2022 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).