
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-8-18>



Аспекты природы изнашивания

А. О. Горленко ¹, С. В. Давыдов ¹, В. П. Тихомиров ¹, Е. В. Агеев ² ✉

¹ Брянский государственный технический университет,
бул. 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью работы являлось комплексное изучение природы изнашивания трущихся поверхностей.

Методы. Изнашивание трущихся поверхностей деталей всегда сопряжено с протеканием в них сложных физико-химических процессов. Материал, качество обработки трущихся поверхностей, характер контакта и скорости их перемещения относительно друг друга, вид и значения нагрузки, виды трения и смазки, качество смазочного материала, а так же наличие третьего тела между рассматриваемыми поверхностями и некоторые другие факторы оказывают колоссальное влияние на скорость изнашивания. В ГОСТ 27674-88 приведено классическое определение изнашивания, в соответствии с которым, ключевой причиной изнашивания является разрушение кристаллической решетки твердого тела, вследствие потери ее прочности, на фрагменты (блоки или частицы) определенной размерности с их последующим удалением из зоны контакта трибоповерхностей. Однако детальный механизм отделения материала с поверхности трения далеко не ясен и не проработан с позиций классического материаловедения. Предложена новая концепция природы трения и изнашивания. Кристаллическая решетка любого металла, а тем более сплава, есть анизотропная среда и эта анизотропность значительно усиливается на масштабе кристаллической структуры сплава, поскольку ориентация кристаллической структуры внутри каждого зерна разнонаправлена. Следовательно, напряженно-деформированное состояние структуры в поверхностном слое трибосопряжения необходимо оценивать с позиций анизотропности среды.

Результаты. Для оценки влияния на процессы изнашивания были исследованы следующие факторы: нагрузочно-скоростные; физико-механические; структурные; теплофизические. Разработана оригинальная методика определения интенсивности изнашивания, позволяющая оценить и прогнозировать долговечность конкретного узла трения. Сравнение с экспериментом показало удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс изнашивания.

Заключение. Природа изнашивания заключается в наличии напряжений в материалах контактирующих поверхностей, которые стремятся избавиться от них диспергированием отдельных частиц различной размерности, приближаясь к минимуму производства энтропии.

© Горленко А. О., Давыдов С. В., Тихомиров В. П., Агеев Е. В., 2023

Ключевые слова: *поверхностный слой; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; аспекты природы изнашивания.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: *Аспекты природы изнашивания / А. О. Горленко, С. В. Давыдов, В. П. Тихомиров, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 8-18. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-8-18>.*

Поступила в редакцию 16.01.2023

Подписана в печать 10.02.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Наиболее известные в настоящее время теории трения и изнашивания охватывают в основном только молекулярные (адгезионные) и механические (деформационные) составляющие процесса и не учитывают параметры качества обработки сопряженных поверхностей трения [1-5].

В связи с этим, предлагается новый подход к оценке природы процессов трения и изнашивания.

При контакте перемещающихся относительно друг друга поверхностей, которые имеют определенные неровности профиля и предрасположенность к межатомному взаимодействию, начинают развиваться процессы, которые и обуславливают изменения микрогеометрических и физико-механических характеристик сопряжения, что и является природой трения. Контактующие трущиеся поверхности стремятся избавиться от напряжений в материалах (природа изнашивания) методом диспергирования отдельных частиц различной размерности, стремясь к минимуму энтропии [6-10].

Целью настоящей работы являлось комплексное изучение природы изнашивания трущихся поверхностей.

Материалы и методы

Процесс изменения размеров тела при трении, который сопровождается отделением с соприкасающихся поверхностей материала и (или) образованием остаточной деформации в соответствии с ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка» называется изнашиванием.

Материал, качество обработки трущихся поверхностей, характер контакта и скорости их перемещения относительно друг друга, вид и значения нагрузки, виды трения и смазки, качество смазочного материала, а так же наличие третьего тела между рассматриваемыми поверхностями и некоторые другие факторы оказывают колоссальное влияние на скорость изнашивания [11, 12].

Если исходить из определения изнашивания по ГОСТ, ключевой причиной изнашивания является разрушение кристаллической решетки твердого тела, вследствие потери ее прочности, на фрагменты (блоки или частицы) опре-

делённой размерности с их последующим удалением из зоны контакта трибоповерхностей. Однако детальный механизм отделения материала с поверхности трения далеко не ясен и не проработан с позиций классического материаловедения.

Внешние силовые параметры контакта (характер нагружения) и возникающие физико-химические процессы при изнашивании являются вторичными по отношению к собственно процессу разрушения кристаллических решеток контактирующих тел в трибосопряжении, и либо ускоряют, либо замедляют данный процесс.

С позиций общей термодинамики процесс изнашивания есть циклический процесс накопления и сброса внутренней энергии структурой сплава (материала) в процессе внешнего силового контакта трибоповерхностей. Из этого положения процесс изнашивания можно условно разделить на две стадии:

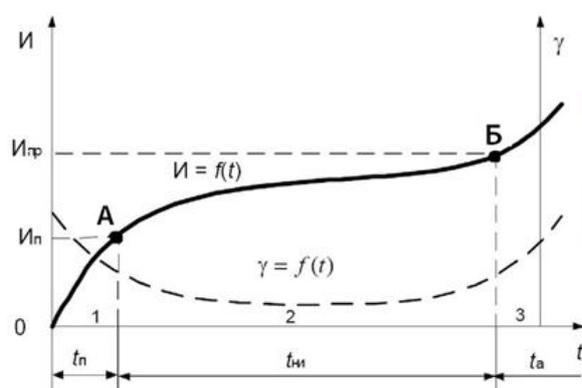
1. *Стадия накопления энергии.* Накопление энергии структурой металла с

исходным равновесным уровнем до предельного критического уровня.

2. *Стадия сброса энергии.* Отделение областей кристаллической структуры металла с накопленным предельным (неравновесным или критическим) уровнем энергии за счет их удаления через разрушения структуры с сохранением структурных областей металла с не критическим уровнем накопленной внутренней энергии.

Процесс накопления энергии кристаллической структурой металла есть процесс ее эволюции от равновесных структур с минимальным уровнем внутренней энергии, до неравновесных структур с предельным уровнем энергии с последующим их удалением из зоны трибоконтакта. Следовательно, изнашивание есть процесс структурной самоорганизации трибоповерхностей при их энергосиловом контакте.

Данный вывод можно проиллюстрировать с высокой степенью корреляции на типовой нормальной кривой изнашивания (рис.1).



И — весовой износ; γ — скорость изнашивания;
 t — время; t_n — период приработки;
 $2 - t_{ни}$ — период нормального изнашивания (участок А–Б);
 $3 - t_a$ — период катастрофического изнашивания;
 I_n — износ за период приработки;
 I_{np} — предельный износ;
 $I = f(t)$ — кривая изнашивания;
 $\gamma = f(t)$ — кривая скорости изнашивания

Рис. 1. Нормальная кривая изнашивания трибосопряжений

Структурную самоорганизацию материала поверхностей трибосопряжения необходимо рассматривать только парно, в условиях их сопряжения и взаимного влияния при контакте. Если исходная структура каждой трибоповерхности перед трибоконтактом и соответствовала минимальной равновесной внутренней энергии (условно – «нулевой» энергии), то в начальный момент трибоконтакта их структурная организация уже не соответствовала взаимному внутреннему энергетическому равновесию.

Следовательно, в период приработки $t_{\text{п}}$ (см. рис. 1) происходит взаимное структурное изменение материалов трибоузла до их структурного состояния, соответствующего взаимной минимальной разнице внутренней энергии для каждой структуры материала в точке А (см. рис.1). Чем меньше разница в уровнях исходной («нулевой») внутренней энергии материала, тем меньше время $t_{\text{п}}$ приработки трибосопряжения и скорости его износа. Таким образом, в т.А (см. рис. 1) разница накопленной внутренней энергии структурами сплавов трибосопряжений в процессе приработки должна быть минимальной.

Из этого положения следует, что чем дольше сохраняется данный минимум разности внутренней энергии структур контактирующих сплавов при заданных условиях трибоконтакта, тем более износостойкой будет данное трибосопряжение двух сплавов. Тем более длительным будет период нормального изнашивания $t_{\text{ни}}$ (рис.1, участок А-Б). Фактически, период $t_{\text{ни}}$ (см. рис. 1) есть

время стабильного существования равновесных структур сплавов в трибосопряжении.

Для дальнейшего анализа введем понятие «внутренней структурной энергоемкости» сплава – $U_{\text{стр}}$.

Исходное или «нулевое» энергетическое состояние структуры трибосплавов (после их финишной механической обработки в поле допуска под трибопосадку) соответственно обозначим как $U^0_{\text{стр}1}$ и $U^0_{\text{стр}2}$.

Перед началом процесса износа в т.0 (см. рис. 1) возможны два варианта:

1. $U^0_{\text{стр}1} - U^0_{\text{стр}2} = U_{\text{стр}}(\text{max})$ – разница исходной внутренней структурной энергоемкости сплавов максимальна, максимально как время приработки, минимален и уровень износа.

2. $U^0_{\text{стр}1} - U^0_{\text{стр}2} = U_{\text{стр}}(\text{min})$ – разница исходной внутренней структурной энергоемкости сплавов минимальна, минимально как время приработки, минимален и уровень износа.

В процессе приработки происходит взаимная самоорганизация структур сплавов, внутренняя структурная энергоемкость которых соответствует их минимальной разнице:

$$U_{\text{стр}1} - U_{\text{стр}2} = U_{\text{стр}}(\text{min}).$$

Данное выражение справедливо, прежде всего, для анизотропных структур, даже при условии одинакового фазового состава каждого сплава в трибоконтакте.

Абсолютная структурная совместимость по завершению периода приработки должна соответствовать нуле-

вой разнице их внутренней структурной энергоемкости:

$$U_{str1} - U_{str2} = 0.$$

В этом случае структурная организация сплава не обязательно должна быть одинаковой, т.е. структуры могут быть совершенно разными по фазовому составу и степени дисперсности, однако это условие реализуется только для изотропных структур трибоповерхности (монокристалл, твердые растворы, полимерные покрытия и т.п.).

Равновесная структура в трибосопряжении не может сохраняться бесконечно долго, что связано с ростом энтропийного фактора или необратимой деградацией структуры сплава, которая связана, прежде всего, с ростом остаточных напряжений (микродеформаций), которые накапливаются, например, в результате закрепления (блокировки) фрагментированных (полосовых, блочных) дислокационных структур (субструктур) в кристаллической решетке сплава и их самоорганизации, а также в результате воздействия других термо-силовых факторов.

При оценке уровня внутренней структурной энергоемкости сплава необходимо учитывать его состояние – анизотропности или изотропности.

В механике твердого тела принято считать, что все кристаллические макротела есть тела изотропные. Применение физики изотропности к напряженно-деформированному состоянию трибоповерхностей может привести не только к ошибкам в построении моделей их разрушения, но и к неверной в

целом физической модели разрушения или износа трибосопряжения.

Кристаллическая решетка любого металла, а тем более сплава, есть анизотропная среда и эта анизотропность значительно усиливается на масштабе кристаллической структуры сплава, поскольку ориентация кристаллической структуры внутри каждого зерна разнонаправлена. Следовательно, напряженно-деформированное состояние структуры в поверхностном слое трибосопряжения необходимо оценивать с позиций анизотропности среды.

Динамику и профиль кривой изнашивания $I=f(t)$ (см. рис. 1) можно объяснить влиянием анизотропности структуры поверхностных слоев трибосопряжения. Деградация структуры сплава или рост энтропийного фактора (разупорядочивание) в каждой структуре контактирующих сплавов может протекать по-разному.

Возможны два варианта:

1. Анизотропность структуры контактирующих поверхностных слоев сплава в достаточной степени однородная. Деградация структуры и динамика накопления избыточной внутренней энергоемкости структуры также примерно одинакова. Следовательно, разница энергий $U_{str1} - U_{str2} = U_{str}(\min)$ практически постоянна и сохраняется довольно длительное время. Кривая изнашивания имеет большую протяженность, малый угол подъема при минимальном износе.

2. Анизотропность структур контактирующих поверхностных слоев сплава резко отличается. Деградация структуры

и накопление избыточной внутренней энергоемкости структуры в одном из сплавов резко возрастает. Следовательно, разница энергий $U_{str1} - U_{str2} = U_{str}(\min)$ с течением времени изнашивания увеличивается и ускоряется. Кривая изнашивания укорачивается, угол подъема возрастает при максимальном износе.

В точке Б (см. рис. 1) процессы структурной деградации начинают преобладать над процессами структурной восстановительной самоорганизации по всему контактному объему сплава, внут-

ренние микронапряжения переходят в локальные микроразрывы внутри зерна или по границам зерен структуры и начинается процесс лавинообразного разрушения контактной поверхности с недопустимым изменением полей допуска на трибосопряжение, т.е. достигается аварийное состояние трибосопряжения.

Функциональное назначение деталей машин обуславливается качеством их поверхности, которое складывается из показателей, представленных на схеме [12]:



Построение физической модели объекта исследования и проведение математического описания процесса его изнашивания – это безусловно два необходимых подхода для проведения надежной оценки показателей изнашивания и прогнозирования работоспособного состояния. Для каждого конкретного случая рассмотрения пары трения экспериментальным путем необходимо найти безразмерный коэффициент износа, используемый в уравнении Арчарда [13, 14].

В целом на процесс изнашивания трущихся деталей оказывает влияние порядка 20 различных факторов. Учесть в эксперименте сразу все их технически невозможно, поэтому исследователи

пришли к выводу, что выбрав только два из них можно провести испытания на износ в условиях, близких к эксплуатационным. И такими факторами являются нормальная нагрузка и твердость изнашиваемого элемента трибосистемы по Арчарду. Нахождение и анализ коэффициента износа делает уравнение Арчарда адекватным

При рассмотрении модели пары трения первого типа (рис. 2 а), в которой одна поверхность шероховатая, а вторая – гладкая и менее твердая, следовательно, шероховатость должна быть описана высотными, шаговыми, гибридными параметрами и фрактальными показателями. Обязательно надо рассмотреть модули упругости и коэффициенты Пуассона

элементов данной пары, а для гладкой поверхности обязательно учесть ее физи-

ко-механические свойства (предел прочности, твердость и т.п.).



Рис. 2. Типы моделей контактного взаимодействия: а – первого типа; б – второго типа

На рис. 2 б представлена модель взаимодействия 2 типа: выступа с упруго-пластическим полупространством, в котором фрикционная связь – пространственное временное образование. Время жизни такой связи составляет $10^{-3} \dots 10^{-7}$ с и зависит от диаметра пятна контакта и от скорости скольжения. Данная связь –

это модель внешнего трения отдельного выступа с упруго-пластическим полупространством, отражающая деформационную и адгезионную природу взаимодействия твердых тел. Формулой Герца возможно описать упругое состояние рассматриваемой связи:

$$a_i = (3/4)^{2/3} \pi (E^{-1} F_i R)^{2/3} \text{ – площадь пятна контакта;}$$

$$E^{-1} = (1 - \mu_1^2 / E_1) + (1 - \mu_2^2 / E_2),$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; F_i – нагрузка на выступ; R – радиус верхней части выступа.

$$h = \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} (E^{-1} F_i R^{-1/2})^{2/3} \text{ – внедрение;}$$

$$d_n = 1,816 (E^{-1} F_i R)^{1/3} \text{ – диаметр пятна;}$$

В полной мере пластическое состояние контакта возможно описать следующими зависимостями (I), а интен-

сивность линейного изнашивания зависимостью (II):

$$\text{I) } a_i = F_i / H; \\ h = F_i / (2\pi R H); \\ d_n = 2 [F_i / (\pi H)]^{1/2}.$$

$$\text{II) } i_h = \frac{h^*}{n d_n},$$

где h^* – средняя толщина износа; n – число циклов нагружения, приводящих к отделению материала (износу).

И.В. Крагельский ввел для нахождения линейной интенсивности изнашивания при множественном контакте соотношение (III), а в источнике [1]

предложено приближение (IV), при помощи которого возможно оценить линейную интенсивность изнашивания:

III)

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a},$$

где A_r – фактическая площадь;
 A_a – номинальная площадь контакта.

IV)

$$I_h = \frac{0,15}{n} \sqrt{\frac{h}{R} \frac{A_r}{A_a}}.$$

Для различных типов контакта расчет циклов можно проводить по следующим соотношениям:

**Упругий
 контакт**

$$n = (\sigma_b / k' \tau_n)^{t_e}$$

Пластическое состояние контакта

$$n = (2\varepsilon_p / \epsilon)^{t_p},$$

где σ_b – предел прочности; k' – коэффициент, равный трем для высокоэластичных материалов и пяти – для хрупких; τ_n – касательные напряжения, обусловленные межмолекулярными взаимодействиями неровности с полупространством; t_e – показатель степени $t_e \in [3 \dots 14]$; ε_p – относительное удлинение, приводящее к разрушению; ϵ – текущее относительное удлинение; $t_p \in [2 \dots 3]$

При рассмотрении модели адгезионного износа уравнение Арчарда можно записать в виде (V) соотношения, а

при пластическом контакте в виде соотношения (VI) и с другой стороны можно применить выражение (VII):

V)

$$V_w = k_w \frac{F_n L}{H},$$

где V_w – объем изношенного материала; F_n – нормальная нагрузка; L – путь трения; H – твердость изнашиваемого материала.

VI)

$$V_w = k_w A_r L.$$

VII)

$$V_l = i_h n d_n A_r.$$

С учетом некоторых допущений получим соотношение $k_w = i_h$, приравняв (V) и (VI). Величина, обратная n , приводящая к износу – это и есть коэффициент износа.

Интенсивность изнашивания не является постоянной величиной и она пропорциональна давлению в контакте,

модулю упругости, коэффициенту трения и параметру h/R :

$$I_h \propto (\sigma^{1+bt}; E^{t-bt-1}; ft; \dots).$$

Результаты и их обсуждение

Наиболее существенно влияющие на процессы изнашивания факторы представлены на схеме [15, 16]:



Предлагаем в качестве основных единиц взять следующие параметры: M – масса, кг; L – длина, м; T – время, с. То-

гда количество критериев подобия k_π в соответствии с π – теоремой Букингэма будет равно:

$$k_\pi = n - r = 6 - 3 = 3,$$

где n – число факторов; r – число основных единиц.

Задав критерии подобия (VIII) (безразмерные комплексы и безразмерный

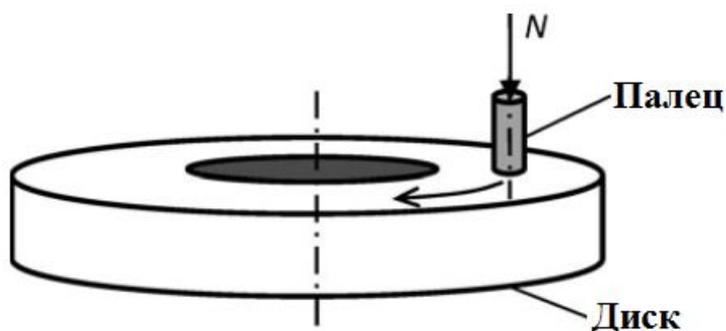
параметр) можем составить критериальное уравнение (IX):

$$\text{VIII)} \quad \Pi_1 = \frac{p}{H}; \quad \Pi_2 = \frac{v d_n}{a}; \quad \Pi_3 = I_h.$$

$$\text{IX)} \quad \Pi_3 = \Pi_1^\alpha \Pi_2^\beta.$$

Показатели степени в критериальном уравнении находят экспериментальным

методом на машине трения (рис. 3) по схеме палец-диск (pin-on-disc).



Характеристика	Палец	Диск
Материал	Сталь А576-1045 / российский аналог – сталь 45)	
Химический состав стали, %	$C - 0,42-0,50$	
	$Si - 0,40$	
	$Mn - 0,50-0,80$	
	$P - 0,045$	
Твердость	$Cr - 0,40$	
	HRC 40	HRC 20

Рис. 3. Схема проведения эксперимента

Износ диска (рис. 4) измерялся с точностью до 0,01 мл гр.



Номинальное давление	$p \in [(1 \dots 12)10^6] \text{ Па}$
Скорость скольжения	$v \in \frac{[0,016 \dots 0,345] \text{ м}}{c}$
Коэффициент температуропроводности	$a = 11,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Площадь контакта пальца с диском	$12,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
Время, за которое оценивался износ	$t = 1800 \text{ с}$
Диаметр пятна контакта (по Эшби [4])	$d_n = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 10^6}{H}$ $= \frac{0,2 \cdot 10^6}{2290 \cdot 10^6} =$ $= 8,73 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$

Рис. 4. Внешний вид диска и характеристики испытания

Fig. 4. Appearance of the disk test characteristics

Запишем критериальное уравнение в следующем виде:

$$П_3 = C_0 + C_1П_1 + C_2П_2.$$

Решая векторное уравнение (рис. 5) можно найти его постоянные.

$$X1 := \begin{pmatrix} 1 & 8,734 \cdot 10^{-4} & 0,483 \\ 1 & 1,31 \cdot 10^{-3} & 0,843 \\ 1 & 3,493 \cdot 10^{-3} & 1,763 \\ 1 & 4,367 \cdot 10^{-3} & 0,881 \\ 1 & 5,24 \cdot 10^{-3} & 2,644 \end{pmatrix}$$

$$Y1 := \begin{pmatrix} 1,821 \times 10^{-8} \\ 2,141 \cdot 10^{-8} \\ 1,986 \times 10^{-8} \\ 2,797 \cdot 10^{-8} \\ 0,8647 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

$$(X1^T \cdot X1)^{-1} \cdot X1^T \cdot Y1 = \begin{pmatrix} 2,444 \times 10^{-8} \\ 2,927 \times 10^{-6} \\ -1,071 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Нахождение постоянных критериального уравнения: $C_0=2,444 \cdot 10^{-8}$; $C_1=2,927 \cdot 10^{-6}$; $C_2=-1,071 \cdot 10^{-8}$

Fig. 5. Finding the constants of the criterion equation: $C_0=2,444 \cdot 10^{-8}$; $C_1=2,927 \cdot 10^{-6}$; $C_2=-1,071 \cdot 10^{-8}$

Определив для первой строки критерии подобия, получаем конечное критериальное уравнение для установившегося изнашивания после приработки в течение ~ 100 с:

$$П_1 = 2/2290 = 8,734 \cdot 10^{-4};$$

$$П_2 = (0,063 \cdot 8,73 \cdot 10^{-5}) / (11,39 \cdot 10^{-6}) = 0,483;$$

$$П_3 = 1,821 \cdot 10^{-8}.$$

$$I_h = 2,444 \cdot 10^{-8} + 2,927 \cdot 10^{-6} П_1 - 1,071 \cdot 10^{-8} П_2$$

Затем проводится проверка данного аналитического выражения на адекватность методом сравнения расчетных и экспериментальных данных (рис. 6).

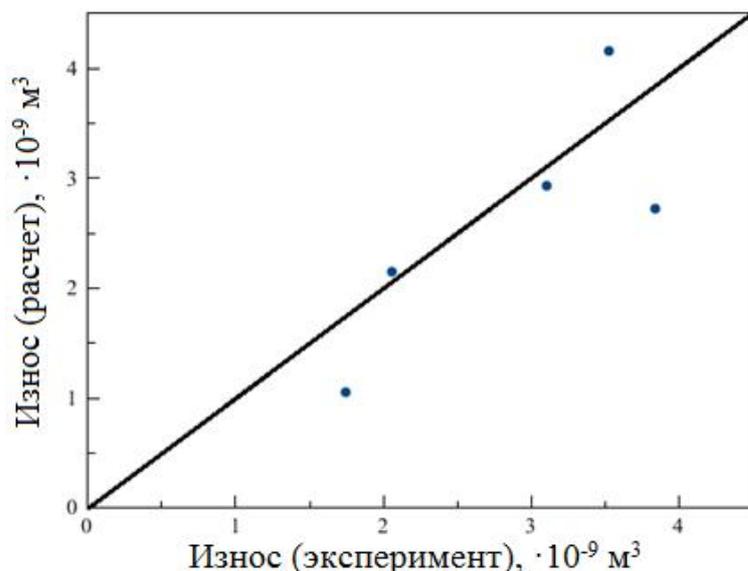


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Анализ проведенного сравнения показал удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, которые оказывают наибольшее влияние на процесс изнашивания.

Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [17-20].

Выводы

1. Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания.
2. Разработана оригинальная методика определения интенсивности изнашивания, позволяющая оценить и прогнозировать долговечность конкретного узла трения. Сравнение с экспериментом показало удовлетворительную сходимость в данном диапазоне изменения факторов, влияющих на процесс изнашивания.

Список литературы

1. Попов О.Н., Винокуров Г.Г. Применение теории марковских цепей для моделирования изнашивания поверхности трения порошковых материалов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 5 (61). С. 67-77.
2. Винокуров Г.Г., Старостин Е.Г., Попов О.Н. Использование теории марковских цепей для описания изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения // Вестник машиностроения. 2018. № 2. С. 35-40.

3. Пальчикова Г.С., Кривцов А.Н., Москалюк Д.Д. Анализ теории трения и изнашивания полимерных материалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7. № 1 (44). С. 279-282.

4. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тормозов авиаколес / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, В.Д. Кожемякина, Ю.Г. Сверчков, А.И. Бакин, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 3. С. 261-268.

5. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тяжелонагруженных тормозов транспортных машин / А.В. Чичинадзе, В.Д. Кожемякина, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 31-37.

6. Инженерия поверхности деталей / колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

7. Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 5(80). С. 24 – 35. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35>.

8. Справочник технолога / А.Г. Сулов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров, А.П. Бабичев, П.Ю. Бочкарев, А.О. Горленко и др.; под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2019. С. 391 – 398.

9. Горленко А.О. Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей электромеханической обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 1(91). С. 8 – 16.

10. Дегтярев Н.М., Пастухов А.Г. Механическая обработка крестовин карданных шарниров, упрочненных электромеханической обработкой // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 339-343.

11. Шец С.П., Горленко А.О., Болдырев Д.А. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта // Сталь. 2022. № 2. С. 27 – 32.

12. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, В.Б. Ильицкий, А.В. Тотай, А.В. Хандожко, А.О. Горленко и др.; под ред. А.Г. Сулова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. С. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533.

13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities // Tribology Transactions. 2015. 58. P.148-157.

14. Ashby M.F., Abulawi J., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding // Tribology Transactions. 1991. Vol.34, Series 4. P. 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. № 2. P. 245 – 250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. № 5. P. 519 – 522.

17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Чернов, Г.С. Маслов, Е.И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85-90.

18. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

19. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

20. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

Информация об авторах

Горленко Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: bugi12@bk.ru
SPIN-код: 4377-4421,
AuthorID: 175172

Давыдов Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор триботехнического материаловедения и технологии материалов, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: fulleren_grafen@mail.ru

Тихомиров Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры трубопроводных транспортных систем, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: vtichomirov@mail.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>