

ISSN 0370-2197

**57**

НАЦІОНАЛЬНИЙ  
АВІАЦІЙНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ



**ПРОБЛЕМИ  
ТЕРТЯ**

**ТА ЗНОШУВАННЯ**

ptznau12@ukr.net

ДК 539.621.890(-82)

### **Проблеми тертя та зношування**

Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. / голов. ред. М.В.Кіндрачук. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – 288 с.

Описано результати наукових досліджень у галузі тертя та зношування.

Розглянуто актуальні питання теорії тертя та зношування, сучасні методи дослідження процесів, які розвиваються на поверхневих шарах контактуючих тіл під час тертя, а також методи підвищення зносостійкості матеріалів та відновлення поверхонь деталей.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються питаннями тертя та зношування.

**Редакційна колегія:** *О. Ф. Аксьонов*, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук; *В. М. Голубець*, д-р техн. наук; *В. В. Запорожець*, д-р техн. наук; *В. І. Дворук*, д-р техн. наук; *О. В. Диха*, д-р техн. наук; *С. Р. Ігнатович*, д-р техн. наук; *М. В. Кіндрачук*, д-р техн. наук (головний редактор); *С. А. Клименко*, д-р техн. наук; *А. О. Корніско*, канд. техн. наук (відповідальний секретар); *А. Г. Косторнов*, академік НАН України, д-р техн. наук; *І. А. Кравець*, д-р техн. наук; *Г. О. Кривов*, д-р техн. наук; *А. П. Кудрін*, канд. техн. наук; *В. Ф. Лабунець*, канд. техн. наук (заступник головного редактора); *В. І. Мірненко*, д-р техн. наук; *Р. Г. Мнацаканов*, д-р техн. наук; *М. І. Папичко*, д-р техн. наук; *В. І. Тихонович*, д-р техн. наук; *В. М. Шмаров*, д-р техн. наук;

*Рекомендовано до друку вченою радою Національного авіаційного університету (протокол № 3 від 21 березня 2012 року).*

Зареєстровано Міністерством юстиції України.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації.

Серія КВ №11172-52Р від 18 квітня 2006 року.

Науково-технічний збірник «Проблеми тертя та зношування» входить до переліку наукових фахових видань з технічних наук, затвердженого ВАК України (постанова № 1-05/3 від 08.07.09 р.)

Адреса редакції: 03680, Київ-58, пр-т Космонавта Комарова, 1, НАУ.  
Тел. (044)406-77-73, факс (044)497-51-28, e-mail: ptznau@ukr.net

© Національний авіаційний університет, 2012

11. *Костецкий Б.И.* Механохимические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.С. Натансон, Л.Л. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 170с.

12. *Буден Ф.* Трение и смазка твердых тел: [Монография] / Ф. Буден, Д. Тейбор; Пер. с англ. Под ред. д-ра техн. наук И. В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543с.

13. *Постников С.Н.* Электрические явления при трении и резании: [Текст] / С.Н. Постников. – Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1975. – 280с.

14. *Костецкий Б.И.* Процесс схватывания металлов и критерии оценки его интенсивности / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техніка, 1972. Вып. 2. – С.74–77.

15. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов: [Монография] / Р. Хоникомб; Перевод с англ. под ред. докт. физ.-мат. наук Б.Я. Любова. – М.: Мир, 1972. – 408с.

16. *Структуроутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів* / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

17. *Антонюк В.С.* Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу [Текст]: Дис...докт. техн. наук спец. 05.03.01 / В.С. Антонюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 309с.

*Сухенко В.Ю.* **Обоснование основ обеспечения износостойкости мясорезающих инструментов** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С.76–92.

С учетом закономерностей физики твердого тела и физико-химической механики материалов исследованы процессы образования и движения дислокаций при трении и деформации моно- и поликристаллических твердых тел в технологических средах мясорезательных машин, что может быть надежной основой при выборе сталей для режущих инструментов и способов их упрочнения.

Табл.: 3, рис. 6, список лит.: 17 наим.

*Sukhenko V.Y.* **Rationale for the foundations to ensure wear resistance of cutting tools meat**

Taking into account the laws of solid state physics and physical-chemical mechanics of materials studied the formation and motion of dislocations in friction and deformation of mono-and polycrystalline solids in industrial environments cutting tools meat machines, which can be a reliable basis for selection of steels for cutting tools and methods for their strengthening.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2012

*М. Н. Свирид, канд. техн. наук, доц.,  
Ю. И. Казаринов, канд. техн. наук, доц.,  
О. Н. Белас, докт. техн. наук, старш. науч. сотруд*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Национальный авиационный университет, e-mail: [svirid\\_mn@ukr.net](mailto:svirid_mn@ukr.net)

*Рассмотрена схема перемещения электрических зарядов под действием магнитного поля в среде моторного масла. Исследованы условия перемещения модифицирующих добавок и электрических зарядов в магнитном поле при трении.*

**Введение.** Конструктивные элементы машин и механизмов в условиях эксплуатации подвержены различному воздействию (механическому, электромагнитному, химическому и т.д.). Зачастую не всегда удается сразу объяснить природу физических процессов и создать соответствующую им математическую модель при комплексном воздействии различных факторов на рабочие детали машин.

**Целью** работы является установление влияния магнитного поля (МП) на процесс трения прецизионных пар (ПП) и теоретическая интерпретация поведения заряженных частиц в условиях скачка свободных зарядов.

**Задачей** является исследование влияния МП и условия скачка свободных зарядов в среде моторного масла на трибологические параметры ПП сталь-медный сплав.

Исходя из закона Фарадея [1]: источниками электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и изменяющиеся во времени магнитные поля:

$$\oint_L E dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS, \quad (1)$$

где  $E$  – величина электрического заряда,  $B$  – магнитная индукция,  $S$  – площадь замкнутого контура,  $l$  – замкнутый контур,  $t$  – время.

В теореме о циркуляции вектора  $H$  (напряжённость МП) указывается, что магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями. Таким образом, изменяя плотность тока на

правленным действием магнитной индукции, можно создать оптимальные условия для скачка свободных электронов.

$$\oint H dl = \int_s \left( j + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS, \quad (2)$$

где  $D$  – поток электрической индукции,  $j$  – плотность электрического тока.

Рабочие поверхности деталей машин непрерывно испытывают воздействие МП, интенсивность которого может изменяться от слабой (природный фон  $5 \times 10^{-5}$  Тл) до сильной (соизмеримой с мощностью искусственного источника МП).

Материалы с разными магнитными свойствами по-разному ведут себя в МП. При этом, материалы с парамагнитными свойствами (олово, свинец, алюминий) втягиваются в МП. Под действием направленных линий МП ионы металлов, находясь в составе масла, будут активно смещаться в зону трения, адсорбируясь на поверхности в местах фактической площади контакта (ФПК). Атомарный кислород, обладающий парамагнитными свойствами, активно участвует в процессах трения, так как будет втягиваться в зону положительного градиента МП. Избыточное количество кислорода провоцирует окисление свежесформированных поверхностей трения с ростом трибологических плёнок. Основные элементы бронзовых сплавов цинк и медь (диамагнетики) смещаются в сторону отрицательного градиента МП.

Сталь и медный сплав в ПП обладают неодинаковыми магнитными свойствами, а также оказывают различное влияние на заряженные частицы в рабочей зоне трения при направленном воздействии МП.

Для исследований влияния электромагнитного поля на равномерно движущуюся смазывающую среду (диэлектрика) рассмотрим постоянное электрическое поле, которое обладает потенциалом  $\psi$  согласно уравнению Максвелла. Соединенные друг с другом обкладки конденсатора (поверхности трения) имеют одинаковый потенциал. Поэтому электрическое поле не только в металле обкладок, но и в диэлектрике между ними будет отсутствовать. Электрическая индукция  $D$ , очевидно, также будет равна нулю в металле обкладок, однако в движущемся диэлектрике, приобретет определённую величину [1]:

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon E + \left( \varepsilon - \frac{1}{\mu} \right) \left[ \frac{u}{c} \cdot B \right] = \varepsilon E - \frac{1}{\mu} \left[ \frac{u}{c} \cdot B \right] \\ H &= \frac{1}{\mu} B + \left( \varepsilon - \frac{1}{\mu} \right) \left[ \frac{u}{c} \cdot E \right] = \frac{1}{\mu} B + \varepsilon \left[ \frac{u}{c} \cdot E \right], \\ D &= (\varepsilon - 1) \left[ \frac{u}{c} \cdot B \right] \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $u$  – скорость перемещения среды,  $c$  – скорость света.

Таким образом, величина МП в движущемся диэлектрике будет такой же, как если бы он находился в статическом состоянии. Электрическая индукция в нем будет равна (рис. 1):

$$D_x = D_y = 0, \quad D_z = -\frac{(\varepsilon - 1)u}{c} H. \quad (4)$$

Таким образом, в рассматриваемом случае МП проявляет себя только через одну составляющую вектора индукции (нормальная составляющая  $D_z$  вектора  $D$ ) а, к тому же изменяется скачкообразно на границах между диэлектриком и обкладками конденсатора [1]. В нашем случае обкладка (образец) – это поверхность, расположенная над диэлектриком прослойкой между поверхностями трения. На основании пограничного условия это означает, что на поверхностях трения находятся поверхностные свободные заряды (рис. 1, точка 1), обладающие плотностью:

$$\sigma = \pm \frac{1}{4\pi} D_z = \pm \frac{(\varepsilon - 1)u}{4\pi c} H. \quad (5)$$

Усиление потока зарядов может происходить за счёт мелкодисперсных продуктов износа, модификаторов масла и распределяться между поверхностями в узле трения под действием внешних энергий электромагнитного поля. Накопление зарядов материала (образца) и присоединение зарядов из состава жидкости (диэлектрика), находящихся между поверхностями трения, провоцируют скачек по направлению  $D_z$  (4) с количеством зарядов (5). В результате чего наблюдается активный перенос материала в процессе трения по направлению оси  $Z$ .

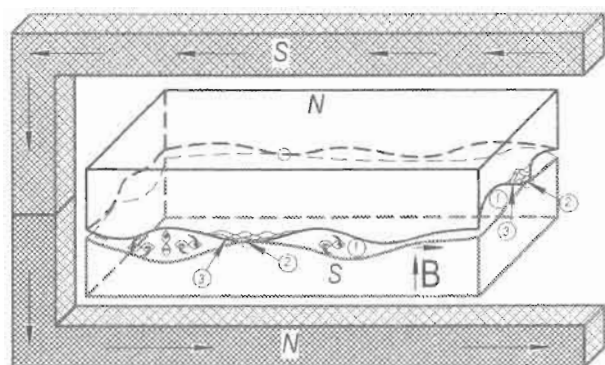


Рис. 1. Схема движения электрических зарядов в МП

Возникновение скачка в направлении  $D_z$  объясняется также уравнениями МП Максвелла. Общая плотность (6) зарядов образуется из нескольких источников. В условиях трения на плотность зарядов, находящихся в составе рабочей среды, влияет количество частиц износа, а также всевозможные модификаторы, изменяющие свойства масла.

$$\sigma'' = k_1 \cdot \sigma' + \sigma, \quad (6)$$

где  $\sigma''$  – общая плотность свободных зарядов,  $\sigma'$  – плотность или количество зарядов в рабочей жидкости узла трения,  $\sigma$  – плотность поверхностных свободных зарядов,  $k_1$  – коэффициент учитывающий направление МП.

Интенсивность магнитного потока усиливается в точках ФПК, что увеличивает плотность всех зарядов, направленных через зону соприкосновения на поверхности трения (рис. 1, точка 2). Электрические заряды и элементарные частички материала строго следуют направлению силовых линий поля.

Для проверки влияния МП на процесс изнашивания ПП был проведен эксперимент, по схеме трения палец-плоскость с направлением МП в сторону ферромагнитного образца (стали 45) в среде моторного масла М10Г2<sub>к</sub>.

Влияние МП и процессов трения в смазочной среде на продукты износа обуславливается изменением направления смещения продуктов по отношению к плоскости трущейся поверхности между образцом и контртелом.

Рабочие части машин и механизмов составляют механическую и энергетическую основу узла трения, все они подвергаются направленному воздействию магнитных силовых линий. Продукты износа процесса трения ферромагнитной природы, попадая в направленное воздействие МП, удерживаются между трущимися плоскостями деталей и являются составной частью в образовании вторичных структур трения. Топографический анализ, проводимый на установке [2] в динамическом режиме трения, указывает на интенсивное удержание продуктов износа (рис. 2) при механическом смещении поверхностей трения и их взаимосвязь с направлением действия МП. Образовавшиеся в процессе износа частицы (конгломераты) удерживаются в зоне трения. Находясь между поверхностями трения, они располагаются на поверхности в направлении МП, к одной поверхности прижимаются, от другой отталкиваются.

Исходя из условий моделирования узла трения плунжерного насоса состоящего из стального поршня и цилиндра – медного сплава, использовали трибопару контртело– медный сплав ЛС59-1 в паре со сталью 45 в среде моторного масла М10Г2<sub>к</sub> модифицированного порошком олова на режимах трения со скоростью 0,1 м/с и нагрузкой 1 МПа, магнитная индукция составляла 0,15Тл.

Металлографические исследования указывают на присутствие значительного количества олова на поверхности стали, что объясняется физическими свойствами парамагнитного материала, который перемещается в положительный градиент МП. Наличие механических частичек на поверхности трения объясняется адгезией модификатора на деформируемых места ФПК.

Сравнительные исследования трибологических параметров без модификации масла определяются большим износом стали (рис. 3). При расположении образца на позиции N–S проходит процесс восстановления, что объясняется смещением продуктов износа диамагнитного



Рис. 2. Конгломераты продуктов износа, попавшие в зону трения. Процесс трения стали 45 по стеклу при  $P=1$  МПа,  $V=0,1$  м/с в динамике ( $\times 125$ )

происхождения из состава контртела в сторону отрицательного градиента МП.

Исследования без влияния МП показали что механизм изнашивания меняется. На поверхности трения не обнаружены составляющие латуни (медь и цинк), а также модификатора (олова) в количествах, которые могут влиять на трибологические параметры.

Замечено, что добавка модификатора (олова) значительно расширяет рабочие нагрузки (до 3 МПа), уменьшая величину прироста образца стали 45 от 0,2 мкм/км до 0 в направлении действия МП на полюсе N и при расположении образца в зоне N-S.

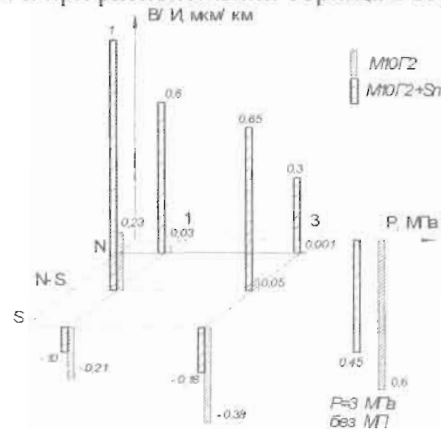


Рис. 3. Трибологические параметры стали 45 в среде MnO<sub>2</sub>, модифицированной оловом по латуни ЛС59-1 в постоянном МП

В зоне полюса S наблюдается процесс износа образца. Изменение состояния системы от процесса репарации до условий износа обуславливается направленным действием МП на структуру ферромагнетика в среде моторного масла.

Широкий спектр магнитных свойств используемых материалов значительно усложняет методику исследования процессов трения в МП. Ферромагнитные продукты износа остаются в зоне действия МП на трёх позициях расположения образца N, N-S и S. Направленное действие силовых линий на продукты износа контртела, состоящего из меди и цинка (диамагнетиков), в зависимости от направления МП к зоне трения изменяют их место расположения и вектор перемещения. Диамагнитная составляющая выносятся из

зоны трения на полюсах или выталкивается – если магнитные линии будут скользить по площади трения (расположения N-S). При смещении зоны трения в пространство уменьшения градиента плотности магнитных линий, можно создать условия перемещения продуктов износа в активные точки трения.

Если не воздействовать МП на процесс трения, то можно наблюдать внедрение частиц модифицирующего порошка в шероховатость поверхности, как образца, так и металлического контртела, что связано с его низкой твёрдостью, но в этом случае уровень работоспособности трибопленок будет ниже, чем при трении с воздействием МП.

**Выводы.** Таким образом, исследованы условия перемещения модифицирующих добавок и электрических зарядов в МП при трении, а также изучены закономерности поведения заряженных частиц в условиях скачка свободных зарядов.

#### Список литературы

1. Можен Ж. Механика электромагнитных сплошных сред / Ж. Можен. – М: Мир, 1991. – 280 с.
2. Свирид М.М., Паращанов В.Г., Занько С.М., Задніпровська С.М., Приймак Л.Б. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування. Пат. 36600, України. МПК G01N 3/56. – №u200809663; Заявл. 23.07.2008; Опубл. 27.10.2008, Бюл. №20 – 6 с.

*Свирид М.М., Казарінов Ю.І., Белас О.М. Математична інтерпретація процесів тертя в магнітному полі // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С.93–99.*

Розглянуто схему переміщення електричних зарядів під дією магнітного поля в середовищі моторного мастила. Досліджено умови переміщення модифікованих добавок і електричних зарядів в магнітному полі при терті.

Рис. 3, список літ.: 2 найм.

*Svirid M.N., Kazarinov Y.I., Belas O.N. The mathematical friction processes interpretation in the magnetic field*

Electric charges moving chart is considered under the action of the magnetic field in the motor oil environment. modifying additions and electric charges moving conditions are researched in the magnetic field during friction.

**Ключевые слова:** трение, магнитное поле, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость. Стаття надійшла до редакції 30.03.2012