

УДК 621.891

Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина*

## ЕДИНОЕ ПОЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ

*Проиллюстрировано единое поле применительно к металлополимерным парам трения тормозных устройств на основе контактно-импульсного взаимодействия микровыступов поверхностей. Последнее включает в себя электрическое, магнитное и тепловое поле, которые между собой взаимосвязаны.*

**Ключевые слова:** *металлополимерная пара трения, контактно-импульсное взаимодействие, электрическое и тепловое поле, единое поле взаимодействия.*

**Введение.** Появившаяся в последнее время работа [1], касающаяся единого поля взаимодействия вселенной заставило нас обратиться к возможности оценки единого поля взаимодействия применительно к металлополимерным парам трения тормозных устройств. Оценку единого поля взаимодействия дают в том случае рассматриваемой системе, если в ней имеют место необратимые процессы. Последние являются неотъемлемой частью контактно-импульсного взаимодействия микровыступов поверхностей металлополимерных пар трения. В свете вышеизложенного и остановимся на состоянии данной проблемы.

**Состояние проблемы.** Металлополимерные пары трения тормозных устройств относятся к открытым электродинамическим системам, как в замкнутом, так и в разомкнутом состоянии.

Указанные системы обмениваются энергиями и газообразными веществами с окружающей средой, изменяя при этом состав и свойства поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения, особенно полимерных фрикционных накладок. При этом на взаимодействующих поверхностях трения формируются вторичные структуры в результате совместного действия деформационных, электрических, магнитных, тепловых, вибрационных, адсорбционных, диффузионных и химических процессов. Большая часть из них является внутренними в связи с электронно-ионной теорией применительно к металлам, полупроводникам и диэлектрикам. Кроме того, в процессе торможения происходит непрерывная диссипация механической энергии в электрическую и тепловую. При этом, последней отводится главенствующая роль во всех процессах. Закономерности указанных преобразований определяются свойствами и структурами трибоматериалов, характером контактно-импульсного нагружения и составом технологической среды.

На основании выше изложенного перейдем к рассмотрению энергетических уровней поверхностных и приповерхностных слоев полимерных накладок.

**Энергетические уровни поверхностных и приповерхностных слоев полимерных накладок.** Активные диэлектрики являются материальной средой, позволяющей достигать непосредственного преобразования энергии и информации. Указанные преобразовательные функции обусловлены физической структурой и химическим составом фрикционных полимерных материалов и их поверхностных и приповерхностных слоев. В табл. 1 приведена классификация основных физических эффектов, которые появились в той или иной степени в полимерной накладке при ее работе во фрикционном узле.

*Таблица 1*

### Основные эффекты в «активных» (smart) диэлектриках

| Отклик                  | Механический           | Электрический                  | Магнитный               | Тепловой                   |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Воздействие             |                        |                                |                         |                            |
| Электрическое поле      | Обратный пьезоэффект   | Поляризация, электрический ток | Электромагнитный эффект | Электрокалорический эффект |
| Магнитное поле          | Магнитострикция        | Магнитоэлектрический эффект    | Намагничивание          | Магнитокалорический эффект |
| Механические напряжения | Деформация             | Прямой пьезоэффект             | Пьезомагнитный эффект   | Упруго-тепловой эффект     |
| Изменение теплоты       | Термическое расширение | Пирозлектрический эффект       | Терромагнитный эффект   | Теплоемкость               |

Для систематизации и наглядности использовали метод «воздействие-отклик». Воздействие на полимерную накладку производится извне при торможении. При этом в зависимости от режима нагружения фрикционного узла в накладке возникают различные поля (механические, электрические, магнитные и тепловые). В полимерных накладках основное воздействие оказывает электрическое поле. При изучении воздействия на них других видов полей (механического, теплового, магнитного) необходимо учитывать изменение электрических свойств ее поверхностных и приповерхностных слоев. Под «откликом» фрикционных материалов полимерной наклейки подразумевают индуцированные в них физические явления. Это может быть не только электрический ток или электрический потенциал (создаваемый зарядами на поверхности и в приповерхностном слое полимерной наклейки), но и деформации, намагничивание, изменение поверхностной и объемной температуры и др. Воздействиями служат векторные поля: электрическое, магнитное, тепловое и тензорные поля, например, поле механических напряжений. Самым слабым воздействием из вышеперечисленных полей обладает магнитное поле, которое в большинстве случаев не изменяет свойств поверхностного и приповерхностного слоев полимерной наклейки, поскольку они являются, преимущественно, диамагнетиками или парамагнетиками.

**Сравнительный анализ энергетических зон материалов пар трения тормозных устройств.** Структура энергетических зон электронов в кристаллических полимерах и металлах качественно различна [2]. При сближении атомов и образовании кристалла электронные уровни энергии атомов за счет их взаимодействия расщепляются, образуя зоны (рис. 1).

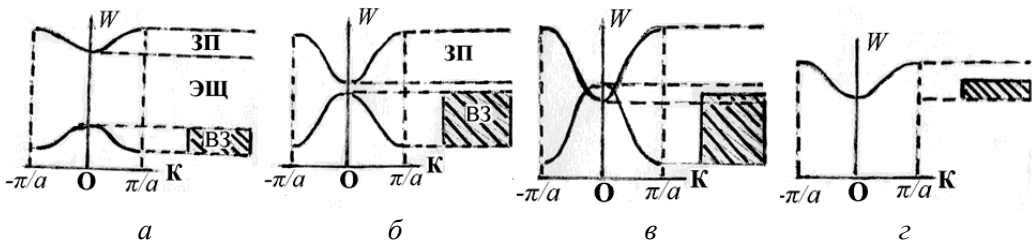


Рис. 1. Сравнение энергетических зон диэлектрика (а) полупроводника (б), полуметалла (в) и металла (з): ЗП – зона проводимости; ВЗ – валентная зона; ЭЩ – энергетическая щель

Особенно сильное расщепление происходит в электрических уровнях внешних (валентных) электронов, так как они сильнее взаимодействуют друг с другом, чем электроны глубинных оболочек атома. Вид электронных спектров кристаллов зависит от особенностей атомных волновых функций частиц и от степени перекрытия их при сближении атомов в процессе образования кристалла. Установлено, что энергетические уровни зон электронов и ионов в материалах элементов трения металлополимерной пары в зависимости от режимов торможения должны обеспечивать достаточную энергоемкость при регламентируемой проводимости (см. рис. 1).

Сравнение энергетических спектров металлов, полуметаллов, полупроводниковых диэлектриков показало следующее (рис. 2). В металлах различие в энергии между валентной зоной и зоной проводимости незначительно, вследствие чего электроны легко меняют энергию, переходя с уровня на уровень. Электроны в металлах практически свободны, они не локализованы и принадлежат всему кристаллу, не образуя пространственно-направленных связей между ионами. Во всех остальных кристаллах большинство электронов в той или иной степени локализовано. В полуметаллах энергия возбуждения практически равна нулю, так что даже при температуре  $T = 0$  должны существовать подвижные электроны, обеспечивающие бесконечно большую проводимость. Тем не менее, уже в полуметаллах большая часть электронов локализована между атомами и образует в кристалле пространственно направленные связи.

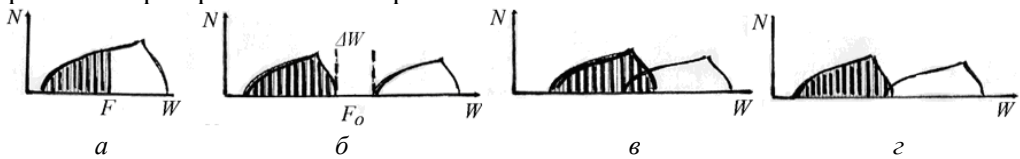


Рис. 2. Распределение плотности электронных уровней в спектрах (заполненные уровни заштрихованы): а – металл с нечетным числом электронов в элементарной ячейке; б – диэлектрик (полупроводник) со щелью  $\Delta W$  между заполненной зоной (валентной) и пустой зоной (зоной проводимости); в – металл с четным числом электронов в ячейке и перекрытием пустой и заполненной зон; г – полуметалл

В полупроводниках (главным образом, ковалентных кристаллах) валентные электроны образуют четко направленные орбитали, связывающие атомы, а энергия возбуждения ( $\Delta W$ ) превышает тепловую энергию ( $\Delta W > kT$ ).

Сформированные в поверхностных и приповерхностных слоях элементов трения термоэлементы, включающие в себя полупроводники с  $p$ - $n$  переходом и объединенные в микротермобатарей, обладают выпрямляющими свойствами. Прямое направление потенциального барьера поверхностного слоя металлического элемента трения связано с градиентом напряжения при условии, что внешнее напряжение перемещает электроны влево, а противоположное направление выполняет функции запирающей зоны. Однако для реализации выпрямляющих свойств необязательно, чтобы  $n$ - $p$  проводники были разделены связующими компонентами термоэлементов. В практике принято вводить в полупроводник (термоэлемент) доноры и акцепторы, образуя таким образом  $p$ - $n$  переход где-то внутри термоэлемента, который является уже отдельной микротермобатареей. Так, например, германиевый пленочный слой может быть снабжен индиевым электродом с одной стороны и сурьмяным слоем с другой, затем нагрет так, чтобы атомы электродов диффундировали внутрь германиевой решетки. В результате этого атомы индия становятся акцепторами, а атомы сурьмы – донорами. Такая рекомбинация электронов и дырок в пленочных микротермобатареях по-

зволяет изменять градиент напряжения, как во внутренней, так и во внешней цепи за счет диффузионных токов, которые влияют на работу выхода электронов из металлического элемента трения. Это обстоятельство указывает на необходимость нового подхода к выбору материалов пары трения, исходя из энергетического уровня их поверхностных и приповерхностных слоев.

Электронный энергетический спектр кристаллов, т.е. распределение электронов по энергиям разрешенных зон, принято описывать в пространстве квазиимпульсов (в обратной кристаллической решетке). Закон дисперсии  $W(p)$  представляет собой простую параболическую функцию:

$$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = p^2 / 2m, \quad (1)$$

где  $m$  – масса электрона.

Учет периодического потенциала кристаллической решетки (метод Блоха) усложняет эту зависимость, приводя к разрывам в параболической зависимости  $W(p)$  в области энергетической щели (запрещенной зоны) (см. рис. 1). Функция  $W(p)$  непрерывна в различных интервалах пространства импульсов, называемых зонами Бриллюэна (например, область  $-\pi/a \leq k \leq \pi/a$  и др.). При переходе от одной зоны Бриллюэна к другой эта функция претерпевает разрывы.

На рис. 2 классификация кристаллов по энергетическому спектру их электронов представлена в несколько ином виде (см. рис. 1). Зоны электронного спектра позволяют построить модели различных вариантов электронных спектров кристаллов для трех основных случаев:

- зоны электрического спектра электронов не перекрываются (см. рис. 2, а, б);
- зоны энергетического спектра электронов перекрываются (см. рис. 2, в, г);
- зоны энергетического спектра электронов соприкасаются без перекрытия.

В первом случае электроны занимают уровни с наименьшей энергией. В основном состоянии ( $T = 0$ ) граница этого заполнения, отделяющая в пространстве импульсов заполненную область от незаполненной части зоны, называется поверхностью Ферми  $F$ . При  $T > 0$  граница этой поверхности размывается, так как за счет тепловых возбуждений (фонов) часть электронов уходит выше  $F$ , в пространстве ниже  $F$  часть уровней освобождается. Поскольку расстояние между уровнями в зоне чрезвычайно мало, то уже сколь угодно малое внешнее электрическое поле ( $\sim 10^{-22}$  эВ) повышает энергию электронов и приводит к электропроводности металлов, ограниченной только рассеиванием электронов на ограничениях решетки. При понижении температуры проводимость металлов растет: при  $T \rightarrow 0, \sigma \rightarrow \infty$ .

Поверхность Ферми в кристаллах с энергетической щелью в электронном спектре отсутствует, но середина этой щели (при отсутствии примесей и локальных уровней) называется уровнем Ферми  $F_0$  (см. рис. 2, б). Для возбуждения электропроводности в этих кристаллах необходимо, чтобы за счет тепловых колебаний или других энергетических факторов частично освободилась валентная зона (дырочный механизм электропроводности) или частично заселилась электронами зона проводимости (электронный механизм электропроводности).

Во втором случае поверхность Ферми полуметаллов имеет разрывы, а их проводимость на несколько порядков по величине ниже, чем у металлов.

В третьем случае кристаллы этого редкого класса называются бесщелевыми полупроводниками. Поверхность Ферми таких полупроводников представляет собой линию или точку в пространстве импульсов. В бесщелевых полупроводни-

ках электроны сравнительно легко (по сравнению с обычными полупроводниками) переходят в зону проводимости, что приводит к существенным различиям в динамических свойствах носителей заряда в этих веществах.

Особое состояние металлического элемента трения наблюдается при температурах выше допустимой для материалов полимерной накладки, которое освещено в работах [3; 4]. Оценка с точки зрения энергетических затрат к такому металлическому элементу трения должна происходить по другим параметрам.

На основании вышеизложенного рассмотрим единое поле энергетических уровней взаимодействия элементов трения металлополимерной пары.

**Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения.** Для соблюдения принципов единого поля взаимодействия необходимо выполнение условия связанности свойств топологической поверхности элементов пары трения с микровыступами, которые рассматриваются как единый объем, а не как сумма двух отделенных друг от друга объемов, или, более строго, непустых непересекающихся открыто-замкнутых подмножеств (подгрупп).

Подмножеством являются поля (электрические, магнитные и тепловые).

Анализ проблемы поиска единого поля взаимодействия (контактно-импульсного) микровыступов поверхностей трения металлополимерной пары начнем с того, что приведем аналогию аналитических зависимостей, описывающих формируемые на их поверхностях электрические и магнитные поля:

$$F_{эл} = \frac{q_1^э q_2^э}{4\pi\epsilon_0 r^2}; \quad (2)$$

$$F_{МГ} = \frac{q_1^М q_2^М}{4\pi\mu_0 r^2}. \quad (3)$$

где  $q^э$ ,  $q^М$  – электрический и магнитный заряды;  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная проницаемость;  $r$  – расстояние между зарядами.

Приведем детальное описание единиц измерения указанных выше констант. Так, например, величина и единица измерения приведенной электрической проницаемости поверхностных и приповерхностных слоев элементов трения металлополимерной пары  $\epsilon_0 = \Phi/m$ , где емкость  $C = q^э / \varphi^э$  – Фарада = Кулон/Вольт отвечает отношению электрического заряда «Кулон» к электрическому потенциалу Джоуль/Кулон = Вольт. Аналогично, для приведенной магнитной проницаемости  $\mu_0 = 4\pi L$  Гн/м (Генри/метр), где индуктивность  $L = q^М / \varphi^М$  – Генри = Вебер/Ампер определяется отношением магнитного заряда (потока) Вольт·с = Вебер к магнитному потенциалу Джоуль / Вебер = Ампер. При этом эксплуатационные параметры «Вольт» и «Ампер», входящие в составляющие приведенных выше зависимостей, имеют скалярную сущность применительно к электрическому и магнитному потенциалу.

Перейдем к перекрестному рассмотрению электрических и магнитных полей. Известно, что корпускулярными электромагнитными характеристиками микро-частицы являются электрический заряд  $|q^э| = n \cdot e$  (где  $n$  – целые числа;  $e$  – заряд электрона), определяющий ее электрические свойства, и собственный угловой момент  $|S| = n(\hbar/2)$  (где  $\hbar$  – модифицированная постоянная Планка) – спин, ответственный за магнитные свойства. Причем спин неразрывно связан с зарядом магнитного диполя частицы  $q^М = n(2\pi\hbar/2e)$ . Об указанном перекрестном взаимодействии свидетельствует тот факт, что оба разных заряда  $q^э$  и  $q^М$  содержатся

в одном элементарном носителе, где спин микрочастицы является результатом электромагнитного взаимодействия ее собственного электрического и магнитного заряда.

Рассмотрим тепловое поле металлополимерных пар трения. В табл. 2 приведены теплообменные процессы при взаимодействии металлополимерных пар трения, в которых в аналитической зависимости (4) при определении кондуктивного теплообмена применен температурный градиент  $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)$  и при конвективном (5) и излучательном (6) вынужденном охлаждении использован градиент количества теплоты  $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau}\right)$ . Все градиенты отнесены к единице времени.

Таблица 2

**Теплообменные процессы при взаимодействии элементов трения металлополимерной пары**

| Вид теплообмена                          | Расчетные зависимости  |
|--|--|
| Кондуктивный                             | $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{(\Delta Q / \Delta \tau)}{mc}$ (4) |
| Вынужденное охлаждение:<br>конвективное; | $\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \alpha(t_1 - t_2)$ (5)                   |
| излучательное                            | $\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = e_1 c_1 A(t_1^4 - t_2^4)$ (6)            |

В приведенных зависимостях (4–6) (табл. 2) использованы следующие обозначения:  $\Delta t / \Delta \tau$  – температурный градиент, °C/c;  $\Delta Q$  – изменение тепловой энергии, Дж;  $m$  – масса слоя элемента трения, кг;  $c$  – теплоемкость элемента трения, Дж/(кг·°C);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхностей металлического элемента трения, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_1, t_2$  – температуры поверхности трения и окружающей среды, °C;  $e_1$  – безразмерное число, изменяющиеся от 0 до 1,0;  $C_\epsilon$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>);  $A$  – площади полированной и матовых поверхностей металлического элемента трения.

Связь между количеством теплоты, аккумулируемой в поверхностных и приповерхностных слоях элементов трения, и электрическим током, генерируемым на взаимодействующих микровыступах поверхностей трения, имеет вид:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = I^2 R \quad (7)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление контактов (микровыступов), Ом.

**Выводы.** Таким образом, подтверждена концепция импульсного взаимодействия электронов и ионов (внутреннее) в приповерхностных и поверхностных слоях элементов трения металлополимерных пар, а также контактно-импульсного взаимодействия микровыступов (внешнее) их поверхностей в едином электрическом, магнитном и тепловом поле.

Установлена взаимосвязь градиентных параметров электрического, магнитного и теплового полей, возникающих и развивающихся в поверхностных и приповерхностных слоях металлополимерных пар трения тормозных устройств,

которые объединены в единое энергетическое поле взаимодействия как при замкнутом так и разомкнутом их состоянии.

### Список литературы

1. Сидоренков В.В. Единое поле силового пространственного взаимодействия материальных тел / В.В. Сидоренков. – Труды VI-ой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». Часть III. – М.: МГТК им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 215 – 224.
2. Закономерности формирования энергетический уровней металлополимерных пар трения / А.И. Вольченко, Н.С. Кулик, М.В. Киндрачук [и др.] // Проблемы тертя та зношування: наук-техн. зб. – К.: НАУ, 2013. – Вип. 59. – С. 2 – 22.
3. Киндрачук М. В. Явление тепловой стабилизации в металлополимерных парах трения (диплом открытия №444)/ М.В. Киндрачук, А.И.Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко. – Заявитель: Национальный авиационный университет (Украина). Приоритет открытия: 31 декабря 1970г.
4. Вольченко Д.А. Научные основы управления износотфрикционными свойствами металлополимерных пар трения тормозов для предотвращения термостабилизационного явления: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.04/ Вольченко Дмитрий Александрович. – Киев, 2012. – 424с. – На укр. яз.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2013

*Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ*

### ЄДИНЕ ПОЛЕ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ

Проілюстровано єдине поле, яке застосовується до металлополімерних пар тертя гальмівних пристроїв на основі контактної-імпульсної взаємодії мікрровиступів поверхонь. Останнє включає в себе електричне, магнітне та теплове поле, які між собою взаємопов'язані.

**Ключові слова:** металлополімерна пара тертя, контактної-імпульсна взаємодія, електричне та теплове поле, єдине поле взаємодії.

*D. Y. ZHURAVLEV*

### THE INTEGRATED FIELD OF INTERACTION OF METAL-POLYMER FRICTION PAIRS

The integrated field applied to the metal-polymer pair friction of the band-shoe brakes is illustrated on the basis of the contact-impulse interaction of the surface microprojections. The integrated field includes electric, magnetic and heat fields which are interrelated.

**Key words:** metal-polymer pair friction, contact-impulse interaction, electric and heat field, integrated field of interaction.

**Журавльов Дмитро Юрійович** – к.т.н., доцент кафедри Механіки машин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.