

УДК 621.891

**Д.А.Вольченко, Н.А.Вольченко, В.С.Скрипник**  
**Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа**  
**НАНОТРИБОЛОГИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В БАРАБАННО-**  
**КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗАХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Проілюстрована нанотрибологія при фрикційному взаємодії пар трення барабанно-колодочного тормоза, исходя из уровней энергетических зон их материалов.*

**Ключевые слова:** нанотрибологія, процеси, явлення, ефекти, макро-міні та нанорівні, дисипативні структури, самоорганізація структур, енергетичні умови, енергетичні зони матеріалів.

*Рис 4. Форм 1. Літ 5.*

**Д.О.Вольченко, М.О.Вольченко, В.С.Скрипник**  
**НАНОТРИБОЛОГІЯ ПРИ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В БАРАБАННО-КОЛОДКОВИХ**  
**ГАЛЬМАХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*Проілюстрована нанотрибологія при фрикційній взаємодії пар тертя барабанно-колодочного гальма, виходячи із рівней енергетичних зон їх матеріалів*

**Ключові слова:** нанотрибологія, процеси, явища, ефекти, макро-міні та нанорівні, дисипативні структури, самоорганізація структур, енергетичні умови, енергетичні зони матеріалів

**D.Volchenko, N.Volchenko, V.Scrypnik**  
**NANOTRIBOLOGY DURING THE FRICTION INTERACTION IN THE DRUM-BLOCK**  
**BRAKES OF THE VEHICLES**

*We've illustrated nanotribology at frictional interaction of pairs of friction of drum-block brake, based on the levels of the energy bands of their materials. The purpose of research - self-assessment of structures of surface and subsurface layers in electro-thermal-mechanical friction in tribounit and levels of the energy bands of it materials. Self-organization of structures is the most common in electro-thermal-mechanical friction in friction units for various purposes in the boundary friction regime. Self-organization in this mode was call structural adaptability. Fundamental principles of tribology are in accordance with the first and second law of thermodynamics. All processes at electro-thermal-mechanical friction arise and develop as a result of two of fundamental phenomena - activation (increase) free energy tribosystem and passivation (reduce it). Fundamental basis of self- energy materials tribosystem is a dynamic equilibrium processes of triboactivation and passivation, in which garner part of structural -thermal activation energy is within the range of the energy required for the formation of secondary structures. We've illustrated the question of the comparative analysis of the energy bands of material friction pairs brakes.*

**Keywords:** nanotribology , processes, phenomena , effects of macro- and mini nanoscale, dissipative structures, . Self-organization of structures, energy conditions, the energy bands of materials.

**Введение.** Решение проблем трибологии применительно к парам трения тормозных устройств при электротермомеханическом трении имеет теоретико-практическое значение. При этом необходимо использовать в прикладных областях знаний результаты фундаментальных наук, касающихся совокупности процессов, явлений и эффектов в электрическом, тепловом, электромагнитном и химическом полях с учетом градиентного изменения их параметров. Разработка фундаментальных положений трибологии позволит обоснованно выбрать наиболее эффективные решения, касающиеся материалов пар трения, исходя из их энергетических уровней поверхностных и подповерхностных слоев, энергоемкости металлических фрикционных элементов, особенности конструкций фрикционных узлов и т.д., т.е. перейти на качественно новый уровень, а в перспективе научно обоснованно управлять трением и износом (рис. 1) за счет одновременного аналитического описания изменения внешних и внутренних параметров.

Внешнее трение является процессом трансформации механической и электрической энергии в энергию внутреннюю. Закономерности этого преобразования определяются свойствами трибоматериалов, характером участия и составом скоростных токов внешней среды. Фундаментальное решение задач трибологии оказалось возможным благодаря достижению теоретической физики в области самоорганизации и образования диссипативных структур под воздействием электротермодинамических процессов, способствующих возникновению электрических, тепловых и химических полей, отвечающим закономерностям единого поля и элементам градиентной теории.

**Состояние проблемы.** Известно, что диссипативные структуры на поверхностях трибосопряжения формируются при следующих условиях.

1. При наличии в системе «импульсной нагрузки – импульсного электрического и теплового тока» [1, 2].

©Д.А.Вольченко, Н.А.Вольченко, В.С.Скрипник

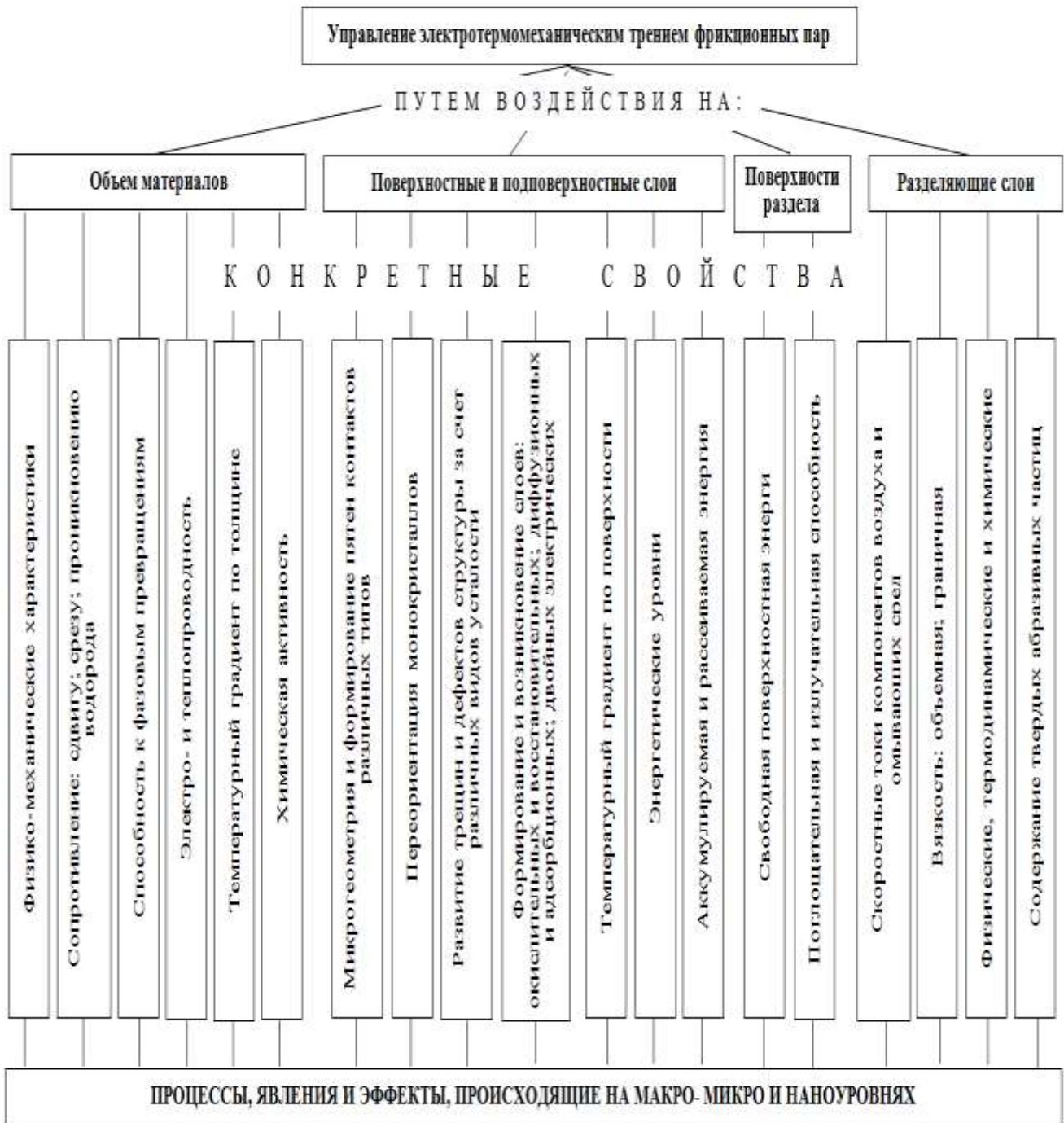


Рис. 1 Связь процессов, явлений и эффектов, происходящие на макро- микро и наноуровнях при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии

2. Система термодинамически открытая, т.е. обменивается энергией и веществами со скоростными токами омывающих сред.
3. Динамические, электрические и тепловые уравнения системы нелинейные и носят волновой характер, изменяются по квазидинаковым закономерностям со сдвигом по фазе [1].
4. Процессы, явления и эффекты на мили-микро и наноуровнях происходят согласовано в строгой последовательности.
5. Отклонения от равновесия превышает как допустимые, так и критические величины внутренних и внешних параметров узлов трения.

Внешнее трение как генератор при фрикционном взаимодействии и при разомкнутых парах трения как конденсатор, упорядоченных и устойчивых диссипативных структур – один из ярких примеров самоорганизации в узлах трения тормозных устройств. Разнообразие и многогранность условий внешнего трения создают возможности возникновения большого многообразия состояний, характеризующиеся на электронно-ионном уровне внутренними параметрами, которые обеспечивают фрикционность и устойчивость трибосистемы. Существование множества самоорганизующихся трибосистем подтверждается работой различных типов фрикционных узлов барабанно-ленточно-колодочных тормозных устройств в режимах нормального трения и износа в интервале температур ниже допустимой для материалов полимерных накладок, и результатами многочисленных исследовательских работ [2-5 и др.]. Самоорганизация и образование диссипативных структур при электротермомеханическом трении может осуществляться путем трансформации твердых, жидкостных и газообразных веществ из поверхностных и подповерхностных слоев трибосопряжения и из скоростных токов компонентов омывающих их сред.

**Цель исследований** – оценка самоорганизации структур поверхностных и подповерхностных слоев при электротермомеханическом трении в трибосопряжении и уровней энергетических зон его материалов.

**Особенности самоорганизации структур при электротермомеханическом трении в трибосопряжениях.** Самоорганизация структур наиболее распространена при электротермомеханическом трении в трибосопряжениях различного назначения в режиме граничного трения. Самоорганизация в этом режиме, названная Б.И. Костецким структурной приспособляемостью [3]. Последняя проявляется в образовании защитных вторичных структур, экранирующих основной металл (например, рабочую поверхность металлического фрикционного элемента) от непосредственного контакта, схватывания и интенсивного разрушения (рис.2). Экранирование основного материала осуществляется массопереносом за счет искрового разряда между микровыступами металлополимерных пар трения. Вторичные структуры, обладающие экстремальными фрикционными и прочностными свойствами, представляют тонко-пленочный объект ( $h_{ec}=20-80$ нм), характеристики которого определяют не только механизмы формирования сил трения и износа, но и демпфирующие свойства.

Ввиду сложности и многогранности процессов, явлений и эффектов при электротермомеханическом трении и износе не могут быть описаны простыми закономерностями. Для их описания необходим комплексный подход, сочетающий одновременное взаимодействие возникающих полей с градиентами их параметров при условии соблюдения фундаментальных положений нанотрибологии с обобщающими закономерностями для решения практических задач.

Влияние неизбежных при электротермомеханическом трении многочисленных факторов, описываемых интегральными энергетическими и кинетическими условиями и параметрами механических, физико-химических, электрических и тепловых свойств материалов трибосистемы. Практические задачи решаются на основе обобщающих зависимостей дифференцированно путем регулирования определяющих внешних и внутренних параметров с помощью конструкторских, технологических и эксплуатационных средств и использованием методов системного анализа.

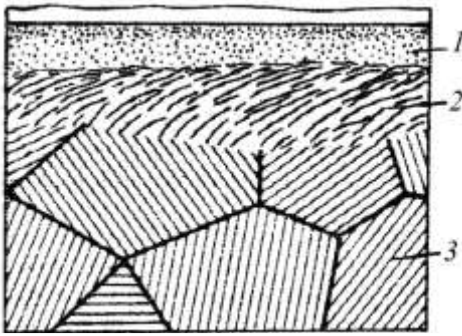


Рис. 2 Схема строения поверхностных слоев при нормальном трении: 1 – слой вторичной структуры; 2 – подповерхностный деформированный слой; 3 – основной металл (по данным Б.И. Костецкого)

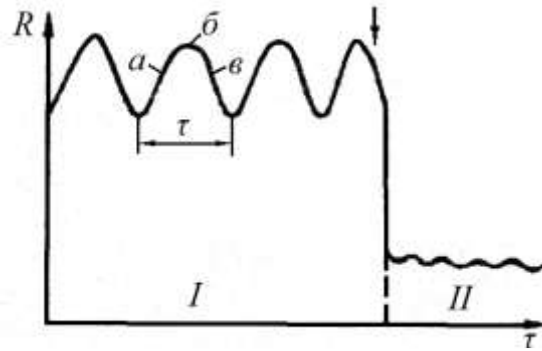


Рис. 3 Изменение контактного электросопротивления  $R$  при динамическом равновесии образования и разрушения вторичных структур и его нарушения:  $I, II$  – области нормального изнашивания и повреждаемости;  $\tau$  – цикл образования ( $a$ ), стабилизации ( $b$ ) и разрушения вторичных структур ( $\epsilon$ )

Предлагаемый комплексный подход на основе теоретических и экспериментальных исследований трибосистемы обосновывается процессами, явлениями и эффектами самоорганизации, приспособляемости и адаптирования в едином энергетическом поле, движущей силой в котором являются механические, электрические, тепловые и химические градиенты, описывающие состояние трибосистемы в процессе ее фрикционного взаимодействия. При этом необходимо учитывать принципы суперпозиции в паре «генерирование-сток» теплоты, а также «восстановление-разрушение» пленок вторичных структур. Экспериментальной основой всего вышеизложенного являются положения об основных и дополнительных видах износа, обобщенная структурно-кинетическая классификация видов поверхностного разрушения, а также зарождения и развития трещин, построенная по структурному и энергетическому признакам, общие закономерности электротермомеханического трения.

Условия самоорганизации в поверхностных и подповерхностных слоях трибосопряжений накладывают отпечаток на допустимые процессы изнашивания и недопустимые явления повреждаемости, зависящими от их энергетических уровней.

**Энергетическое условие самоорганизации трибосистем.** Фундаментальные принципы трибологии находятся в соответствии с первым и вторым началами термодинамики. Все процессы при электротермомеханическом трении возникают и развиваются в результате двух основополагающих явлений - активирования (увеличения) свободной энергии трибосистемы и пассивации (ее уменьшения).

В соответствии с первым началом термодинамики работа сил внешнего трения  $A_{тр}$ , являющаяся источником общего активирования ( $G_{Аобщ}$ ), преобразуется в энергию внутреннюю, структурно-термическую. Неустойчивость активированного состояния трибосистемы выражается в ее стремлении к пассивации. При пассивации основная часть энергии рассеивается, и лишь незначительная часть ( $G_{Аэф}$ ) запасается и затрачивается на образование вторичных структур ( $G_{ВС}$ ). Соотношение между  $G_{Аэф}$  и  $G_{Аобщ}$  оценивается коэффициентом запасаемой энергии [3]:

$$K_э = G_{Аэф} / G_{Аобщ}$$

В соответствии со вторым началом термодинамики энтропия ( $S$ ) в закрытых системах растет. Однако в открытых системах, при определенных условиях, происходят процессы упорядочивания материи, соответствующие уменьшению энтропии и образованию самоорганизующихся диссипативных структур.

Фундаментальной энергетической основой самоорганизации материалов трибосистемы является такое динамическое равновесие процессов трибоактивирования и пассивации, при котором запасаемая часть структурно-термической энергии активирования  $G_{Аэф}$  находится в пределах значений энергии, необходимой для образования вторичных структур  $G_{ВС}$ , т.е.

$$G_{Аэф} = G_{ВС}$$

При нарушении этого равновесия возникает повреждаемость рабочих поверхностей трибо-системы.

**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. 4).

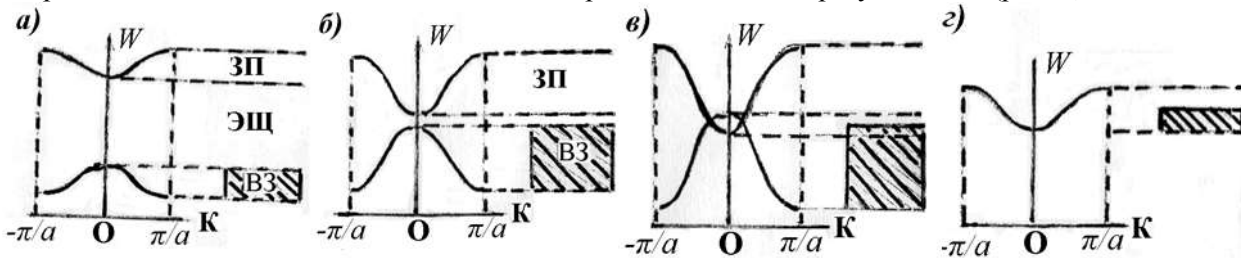


Рис. 4 а, б, в, г Сравнение энергетических зон диэлектрика (а) полупроводника (б), полуметалла (в)

и металла (г): ЗП – зона проводимости; ВЗ – валентна зона; ЭЩ – энергетическая щель

Рекомбинация электронов и дырок в пленочных микротермобатареях позволяет 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 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  $\hbar$  - постоянная Планка;  $m$  – масса электронов;  $p$  – характеристика импульсов.

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. 4). 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.

Зоны электронного спектра позволяют построить модели различных вариантов электронных спектров кристаллов для трех основных случаев:

- зоны электрического спектра электронов не перекрываются (см. рис. 4 а, б);
- зоны энергетического спектра электронов перекрываются (см. рис. 4 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  $F_0$ . 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 полупроводниках 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 [4, 5]. Оценка с точки зрения энергетических затрат к такому металлическому элементу трения должна происходить по другим параметрам.

**Выводы.** Таким образом, на основании самоорганизации структур поверхностных и подповерхностных слоев пар трения в трибосопряжении рассмотрена нанотрибология при электротермомеханических процессах с учетом уровней энергетических зон его материалов.

1. Пат. 2502900 С2 Российская Федерация, МПК F16D 49/08. Способ электродинамического установления закономерностей изменения эксплуатационных параметров металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровой лебедки / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, П.А. Поляков, А.В. Возный; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. - №2012105664; заявл. 20.02.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. №36. – 12с.
2. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные результаты и теоретические модели / Г.В. Дедков // Успехи физических наук. Том 170, №6. – 2000. – С.585 – 618
3. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. редакц. Б.И. Костецкого. – Киев: Техника, 1976. – 296с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1986. – 480с.
5. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475с.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2014