

УДК 621.891

Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ

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

## **НЕРАВНОВЕСНАЯ ТРИБОЛОГИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ (часть первая)**

*Неравновесная трибология во фрикционных парах трения тормозных устройств выражается в непрерывном изменении внутренних и внешних эксплуатационных параметров в их поверхностных и подповерхностных слоях при электротермомеханическом трении.*

**Ключевые слова:** *электротермомеханическое трение, пара трения, металлический и полимерный фрикционный элемент, электронно-ионная теория, робастный подход, энергетическая оценка ресурса накладок.*

**Введение.** Бурное развитие нанотрибологиии воздвигает все новые требования к тормозостроителям, в частности к энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровой лебедки. Известно, что обод тормозного шкива является аккумулятором тепловой энергии, а полимерная накладка накопителем положительных (ионов) и отрицательных (электронов) зарядов. При электротермомеханическом трении пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения в зависимости от работы выхода электронов и ионов с их рабочих поверхностей на площадках взаимодействия формируются различного типа контакты, покрытые пленками с поверхностным сопротивлением, которое влияет на их электропроводность. Время существования контактной пленки и определяет энергонагруженность совокупности пятен контактов микровыступов трибосопряжения.

**Состояние проблемы.** Если импульсные нормальные силы, действующие на пятнах контактов микровыступов, создают поле равномерных удельных нагрузок, то при этом обеспечиваются одинаковые поверхностные градиенты и равномерно распределяются электрические и тепловые токи. Наличие микровыступов взаимодействующих поверхностей различной высоты приводит к концентрации удельных нагрузок и, следовательно, к генерированию электрических и тепловых токов на отдельных участках поверхностей контакта, что способствует повышению локальных температур. Этот процесс назван Бертоном «термоупругой, неустойчивостью». Взаимодействие микровыступов сопровождается, поднятием их участков, где имеют место удельные нагрузки. Другие участки будут понижаться вследствие износа, пока контакт не наступит повсюду. При этом новые контактные участки начинают нагреваться, расширяться и воспринимать нагрузку; старые снижают нагрузку, охлаждаются. Масштаб нагретых участков велик по сравнению с масштабом поверхностных шероховатостей, и время описанного цикла велико по сравнению с временем взаимодействия шероховатостей [1; 2]. Однако в указанных работах не было уделено внимание неравновесной трибологии.

В реальных условиях микровыступы металлополимерных пар при электротермомеханическом трении могут подвергаться следующим термическим нагрузкам: ударное импульсное нагревание и медленное вынужденное охлаждение; моментальное нагревание и вынужденное охлаждение; медленное нагрева-

ние и интенсивное вынужденное охлаждение; нагревание и охлаждение с малыми темпами [3]. Однако выше перечисленные термонагрузки микровыступов трибосопряжения в значительной степени зависят от того каким образом представить трибосистему в виде робастической.

Механизм разрушения тонких металлополимерных пленок на пятне контакта микровыступов трибосопряжения при электротермомеханическом трении имеет полярно-чувствительный характер, связанный с электромиграционными процессами [4], происходящими в двойных электрических слоях рабочих поверхностей металлического и полимерного фрикционных элементов

Ресурс пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок является самым низким по сравнению с износом деталей подвижных соединений и обычно не превышает 5,0 – 7,5 тыс. часов. Время испытаний при определении электротермомеханического износа поверхностей трибосопряжения измеряется в сотнях - а характеристик отказа - в тысячах часов. при разработке качественно усовершенствованных фрикционных узлов тормоза с новыми материалами, что приведет к увеличению времени испытаний, подтверждая тем самым бесперспективность эмпирического подхода. Нужен переход от экстенсивных к интенсивным методам оценки износа пар трения тормоза, исходя из концепции затрат мощности электротермического трения в суммарную составляющую которой входят механическая, электрическая и тепловая компоненты.

**Постановка задачи.** В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к данной проблеме:

- неравновесная трибология при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии;
- электропроводность поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения;
- робастный подход при оценке процессов, явлений и эффектов в трибосистемах;
- энергетическая оценка ресурса фрикционных накладок в узлах трения ленточно-колодочного тормоза.

**Цель работы:** Обосновать неравновесную трибологию пар трения ленточно-колодочного тормоза представленной в виде робастной системы с последующим определением в ней энергетической компоненты ресурса фрикционных накладок в узлах трения.

**Неравновесная трибология при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии.** Трибологические системы, т.е. каждый фрикционный узел являются неравновесными. Особенно это касается полимерной накладки в которой в поверхностных и приповерхностных слоях происходят необратимые процессы, явления и эффекты. Последние имеют место в едином поле фрикционного взаимодействия на нано, микро и макроуровнях для которых являются характерными: самоорганизация, существование иерархии внутренних пространственно-временных масштабов изменения параметров, устойчивых стационарных состояний и непредсказуемых бифуркаций, нелинейности взаимодействия и других факторов.

Два контактирующих твердых тел, между микровыступами которых циркулируют скоростные токи омывающих сред и вызывающими островки жидкости при выгорании связующих элементов с поверхностных и приповерхностных слоев полимерных накладок в случае достижения допустимой температуры для

ее материалов и образуют неравновесную трибологическую систему. Под воздействием среды в системе возникают процессы, явления и эффекты электротермомеханического трения и износа, и как следствие, отказа. Характеристиками процессов, явлений и эффектов являются результаты принципов суперпозиции внутренних свойств трибосистемы «нагревание – охлаждение», «подвод и сток теплоты», «расширение и сжатие», «податливость – жесткость» и др., как объекта в едином поле энергетического взаимодействия, а также состояния скоростных токов омывающей среды, включающей три составляющих: трехмерное пространство в виде конструкции фрикционного узла, двухмерное пространство внешних эксплуатационных параметров (скорость скольжения, импульсные: сила трения, нормальные усилия, динамический коэффициент трения, поверхностные и объемные температуры, механические и термические напряжения, тормозные моменты и др.); информационное пространство.

Внешняя импульсная нагрузка воспринимается упругими силами связей между поверхностными атомами пятен микровыступов пар трения. Импульсная суммарная сила этих связей в направлении, нормальном к площади пятна контакта, равна сосредоточенной нагрузке. При относительном движении микровыступов пятен контактов происходит непрерывный процесс разрыва существующих и возникающих новых связей, импульсная суммарная сила этих связей в противоположном направлении движения равна импульсной силе трения. Акт электротермомеханического трения заключается в образовании и разрыве связи между атомами контактирующими микровыступами, при этом генерируются элементарные электрические токи и аккумулируются элементарные тепловые токи под действием импульсных сил трения. Это событие совершается на площадях пятен контакта как минимум восемь микровыступов (по данным академика В.А. Лазаряна) и во временном интервале  $10^{-10}$  с. За время существования связь совершает  $\sim 10^3$  флуктуаций, вызванных электрическими и тепловыми колебаниями атомов. При этом пространство и время существования связи считается минимальным элементом в пространственно - временной иерархической системе трибологических событий.

Мгновенные траектории и состояния отдельных атомов и связей между ними являются ненаблюдаемыми и неизмеримы на наноуровне и поэтому при исследовании электротермомеханического трения используют понятия и методы теории ансамблей и необратимых процессов, явлений и эффектов. В свое время Больцман считал, что необходимо наблюдать за эволюцией всего ансамбля атомов с использованием принципов и методов теории вероятности. Состояние ансамбля в целом описывается соответствующей теорией, которая исследует эволюцию функций распределения и плотности вероятностей. Накопление в локальной зоне, которой являются пятна контактов микровыступов металлополимерных пар трения трибосистем, в результате полевой ионизации макромолекул положительных молекулярных ионов и электронов в полимерной накладке рассматривается как образование квазинейтральной плазмы [2]. В последней возникает эффект дебаевского экранирования зарядов, приводящий к снижению потенциала ионизации молекул, что в свою очередь, ускоряет образование несвязанных зарядов в полимере. Протекание взаимосвязанных процессов, темпы которых увеличиваются со временем, приводят на определенной стадии к взрывообразному изменению свойств материала. Наличие возникающих самоускоряющихся процессов способствует возрастанию концентрации квазисвободных зарядов на поверхности пленки полимерной накладки, время развития которых сопоставимо со временем пробоя пленки.

**Электропроводность поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения.** Величина удельного электрического сопротивления существующих материалов отличается более чем на 30 порядков: приблизительно от  $10^{22}$  до  $10^{-10}$  Ом·м. При классификации материалов по величине удельного электрического сопротивления их принято разделять на два класса: изоляторы и металлы.

В неидеальной кристаллической решетке, искаженной дефектами, примесями инородных атомов и т.д., в поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения фрикционного узла помимо чисто периодического потенциала ионных остовов на электрон действует также случайный потенциал  $\varphi(r)$ , вызванный контактно-импульсным взаимодействием микровыступов поверхностей трения. В таком потенциале электроны предпочитают находиться в областях минимума энергии, т.е. в «ямах» случайного потенциала. Если «горные вершины» (1) и «перевалы» (2) случайного потенциала (рис. 1 в) (разделяющие потенциальные ямы) высоки по сравнению с характерными энергиями  $k_bT$  (энергиями электронов узкого слоя вблизи уровня Ферми) и  $E_F$  (энергиями уровня Ферми), то электрон не может уйти за пределы своей ямы в течение длительного времени. Амплитуда его волновой функции экспоненциально затухает на расстояниях, больших некоторого радиуса локализации  $\xi$ , подобно функции  $\exp(-|r|/\xi)\cos(kr)$ . Такая ситуация изображена на рис. 1, б. Электроны локализованы в пространстве вблизи минимумов  $\varphi(r)$  (см. рис. 1, в) на расстояниях порядка  $\xi$ . Они не принимают участия в переносе заряда, если  $\xi$  намного меньше размера образца  $L$  и среднего расстояния между электронами  $a$  (порядка  $1/n^{d/2}$ ), которое для уровня Ферми равно  $\lambda_F$  (здесь  $d = 1, 2$  или  $3$  – количество поверхностных и приповерхностных слоев металлического элемента трения).

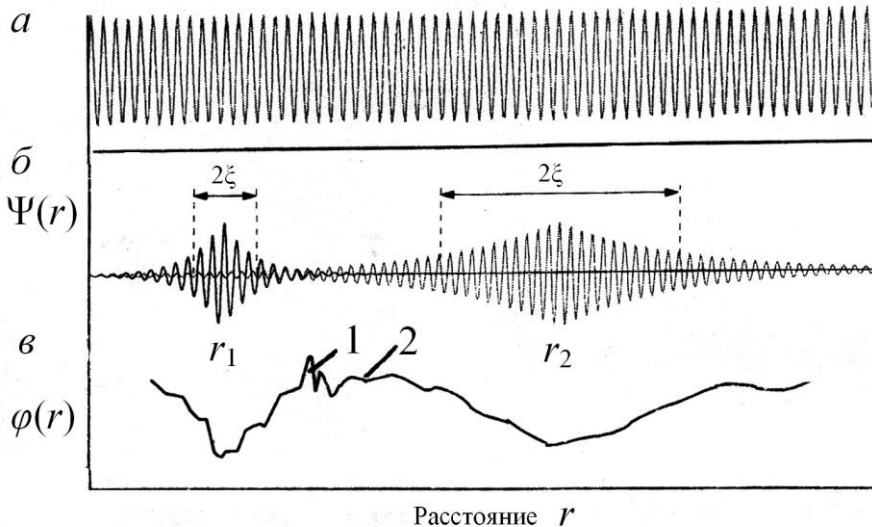


Рис. 1. Схематическое изображение волновых функций в зависимости от координаты для делокализованных (а) и двух локализованных вблизи точек  $r_1, r_2$  (б) электронных состояний в случайном потенциале (в)

При контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар при незначительном изменении внешних параметров, таких как нормальные усилия, удельные нагрузки, внешние электриче-

ские, магнитные и тепловые поля и т.п. большинство фрикционных материалов претерпевают изменение электропроводности на многие порядки, переходя из «диэлектрического» в «металлическое» состояние или наоборот для их поверхностных и приповерхностных слоев.

При классическом подходе к оценке свойств фрикционных материалов необходимо измерить их электропроводность и установить ее зависимость от температуры (рис. 2). В «хороших» проводниках длина волны электрона  $\lambda_F$  намного меньше длины его свободного пробега. Исходя из этого, движение

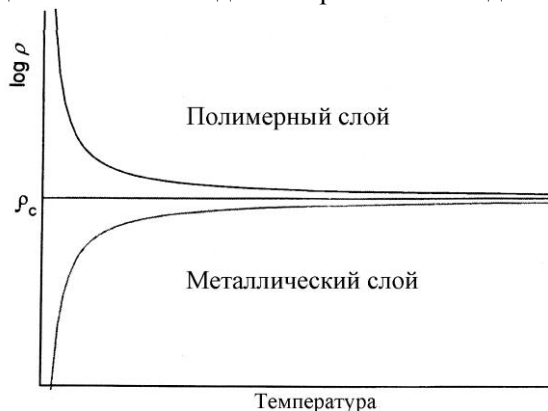


Рис. 2. Температурная зависимость удельных сопротивлений поверхностных и приповерхностных слоев в паре трения «металл-полимер»

электрона может быть описано как случайное движение квазиклассической частицы. Результатом является хорошо известное выражение Друде-Больцмана для проводимости

$$\sigma = ne^2\tau / m, \quad (1)$$

где  $n$  — количество зарядов;  $e$  — величина элементарного заряда;  $\tau$  — время пробега зарядов между столкновениями;  $m$  — эффективная масса электрона.

Сопротивление металлического элемента трения падает при понижении температуры, благодаря уменьшению рассеивания электронов при температурных колебаниях решетки (кванты которых называют фононами). При низких температурах электроны в металлическом элементе трения занимают все квантовые уровни энергии вплоть до самого высокого значения  $E_F$ , называемого уровнем Ферми. В процессах переноса заряда (т.е. электропроводности) принимает участие лишь небольшая часть электронов, занимающих по энергии узкий слой толщиной порядка  $k_B T$  вблизи уровня Ферми.

Металлический элемент трения относится к образцу, в котором  $L \gg \xi$ . В таком элементе электроны могут находиться в двух принципиальных состояниях — «делокализованном» и «локализованном», отвечающим свободно распространявшимся или затухающим плоским волнам. Волновые функции этих двух электронных состояний ортогональные, поэтому электроны не могут переходить из одного состояния в другое.

При увеличении степени разупрочнения, т.е. при увеличении амплитуды случайного потенциала, рано или поздно все состояния электронов станут локализованными. Поэтому можно ожидать, что под влиянием беспорядка произойдет их переход из поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения в поверхностный и приповерхностный слой полимерной

накладки. При этом должна реализоваться некоторая критическая величина беспорядка, вызывающая переход металла в диэлектрик. Ей соответствует критическая величина удельной проводимости  $\sigma_{\min}$ , так называемая минимальная проводимость поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения. Эту идею выдвинул Мотт, который предположил, что переход в металлополимерной паре трения носит скачкообразный характер. Вывод Мотта был основан на более ранних результатах А.Ф. Иоффе и А.Р. Регеля, обративших внимание на то, что в разупрочненном поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения классическая теория проводимости теряет смысл при условии, когда длина свободного пробега электрона  $l$  сравнивается с порядком величины  $\lambda_F$ . В квантовой физике есть единственная комбинация фундаментальных констант, имеющая единицу измерения сопротивления, – это «квант сопротивления»  $h/e^2 \approx 25812,0$  Ом, где  $h$  – постоянная Планка.

Подставляя в выражение  $\sigma = ne^2l/(\varphi_F m)$  для определения проводимости поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения длину пробега Иоффе-Регеля, получили уравнение минимального значения удельной проводимости, которую имеет указанный выше слой:

$$\sigma_{\min} = \frac{4e^2}{3h\lambda_T} \quad (\text{для } d = 3); \quad (2) \quad \text{и} \quad \sigma_{\min} = \frac{e^2}{h} \quad (\text{для } d = 2). \quad (3)$$

Из приведенных зависимостей (2) и (3) следует, что понижение температуры разупрочненного поверхностного и приповерхностного слоев металлического элемента трения способствует изменению проводимости. Эти зависимости проиллюстрированы на рис. 1в в различных интервалах удельного сопротивления  $\rho = 1/\sigma$ :

– если исходное классическое удельное сопротивление Друде мало,  $\rho < \rho_c = 1/\sigma_{\min}$ , т.е. беспорядок в поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения мал, то при  $T \rightarrow 0$  сопротивление должно падать до нуля, а слой должен стать идеальным;

– если беспорядок велик и  $\rho > \rho_c$ , то при  $T \rightarrow 0$  сопротивление должно возрастать, а поверхностный и приповерхностный слой должен стать полимерным с  $\sigma = 0$ .

Рассмотренное выше оставляет открытым вопрос о возможности существования странного критического состояния «неидеального» поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения – при критическом значении беспорядка (при  $\rho = \rho_c$ ) его сопротивление будет конечной величиной при  $T = 0$ .

Электропроводность твердой поверхности полимерной наклейки обусловлена наличием жидкости при температурах, превышающих допустимую для материала наклейки, различных дефектов и загрязнений поверхности. Как уже отмечалось, жидкость является сильнополярным веществом, обладающим заметной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности полимерной наклейки при работе металлополимерной пары трения, чтобы в значительной мере зашунтировать ее высокое объемное сопротивление. Адсорбция влаги на поверхности полимерной наклейки зависит, прежде всего, от относительной влажности окружающей среды. Вместе с тем поведение фрикционного материала наклейки во многом определяется и особенностями ее внутреннего строения. Поэтому удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как параметр самой полимерной наклейки.

По характеру взаимодействия с влагой полимеры подразделяют на гидрофобные и гидрофильные. Гидрофобными называют материалы, поверхности которых не смачиваются жидкостью. В эту группу входят неполярные и слабополярные полимерные материалы. Поверхность таких полимеров не заряжена, и поэтому ее взаимодействие с диполями жидкостей оказывается слабым. Под действием сил поверхностного натяжения, конденсируемая на поверхности накладки влага собирается в виде разрозненных капель (рис. 3, *a*) при разомкнутой паре трения. При этом краевой угол смачивания  $\theta$  оказывается большим (более  $\pi/2$ ). Поэтому даже в условиях очень высокой влажности на поверхности фрикционной накладки не образуется сплошная жидкостная пленка. У таких полимерных материалов удельное поверхностное сопротивление, как правило, велико ( $\rho=10^{17}$  Ом) и слабо зависит от влажности окружающей среды.

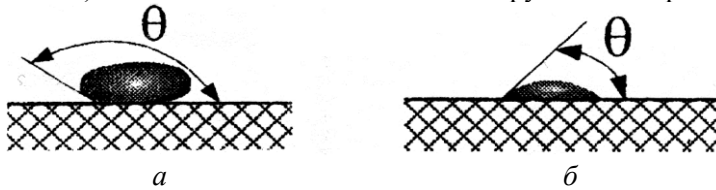


Рис. 3. Форма каплей жидкости на поверхности гидрофобного (*a*) и гидрофильного (*б*) полимерного материала:  $\theta$  – краевой угол смачивания

Гидрофильными называются материалы с малым углом смачивания, т.е. менее  $\pi/2$  (рис. 3, *б*). Ими являются, главным образом, полярные органические и ионные полимеры. В таких материалах энергия межфазного взаимодействия оказывается больше энергии взаимодействия между диполями жидкости. В условиях высокой влажности жидкость растекается по поверхности гидрофильного полимера, образуя проводящую ток пленку. Удельное поверхностное сопротивление ( $\rho$ ) таких полимеров в значительной мере зависит от влажности воздуха. Особенно заметное снижение  $\rho$  наблюдается при относительной влажности более 60%. Вместе с тем в сухой атмосфере  $\rho$  у ионных кристаллов может быть достаточно высоким и достигать значений, близких  $10^{17}$  Ом·м.

**Выводы.** Таким образом, рассмотрена неравновесная трибология при фрикционном взаимодействии пар трения ленточно-колодочного тормоза, а также электропроводность поверхностных и подповерхностных слоев металлополимерных пар трения, влияющих на энергонагруженность трибологической системы.

#### Список литературы

1. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В.И. Колесников. – М: Наука 2003. – 279 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. редакцией А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
3. Джанахмедов А.Х. Синергетика и фракталы в трибологии / А.Х. Джанахмедов, О.А. Дышин, М.Я. Джавадов // Баку: Апостроф, 2014. – 504 с.
4. Трибология / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.]. - Киев-Краснодар: Изд-во «Плай», 2015. – 371 с.

---

*Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ*

**НЕРІВНОВАЖНА ТРИБОЛОГІЯ ПРИ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ ПАР ТЕРТЯ  
ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ (частина перша)**

Нерівноважна трибологія у фрикційних парах тертя гальмівних пристроїв виражається у безперервній зміні внутрішніх і зовнішніх експлуатаційних параметрів в їх поверхневих і підповерхневих шарах при електротермомеханічному терті.

**Ключові слова:** електротермомеханічне тертя, пара тертя, металевий і полімерний фрикційний елемент, електронно-іонна теорія, робастний підхід, енергетична оцінка ресурсу накладок.

*D. YU. ZHURAVLOV*

**NONE-EQUILIBRIUM TRIBOLOGY FRICTION INTERACTION OF FRICTION  
PAIRS OF BRAKING DEVICES (part one)**

In friction pairs of braking devices non-equilibrium tribology is observed during the constant change of internal and external performance parameters in their surface and subsurface layers at the electrothermomechanical friction. It is known that a brake pulley rim is a thermal energy storage accumulator and a polymer lining is a positive (ions) and negative (electrons) charge integrator. During the electrothermomechanical friction of micro-projection contact spots of metal-polymer friction pairs depending on the liberation performance of electrons and ions from their working surfaces different contact types are formed at interaction sites. They are coated with films having the surface resistance which affects their electrical conductivity. The durability of the contact film determines the energy loading of the contact spots of micro-projection tribounits.

**Key words:** electrothermochemical friction, friction pair, metal or polymer friction element, electronic and ionic theory, robust approach, energy assessment of lining resources.

**Журавлев Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 03427 2 71 47, E-mail: [mechmach@nung.edu.ua](mailto:mechmach@nung.edu.ua).