

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК¹, Д. А. ВОЛЬЧЕНКО², С. И. КРЫШТОПА²,
Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ², О. Б. СТАДНЫХ²

¹Национальный авиационный университет, Украина

²Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ БУРОВЫХ ЛЕБЕДОК (часть вторая)

Для реализации компьютерной модели пятен контактов микровыступов пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки при фрикционном взаимодействии рассмотрены особенности электрических и тепловых полей.

Ключевые слова: контакты микровыступов, пятна контактов, поляризация и деполаризация, зарядно-разрядные свойства, электрический баланс токов, разрушение заряда, тепловой импульс.

Введение. В первой части статьи было рассмотрено: состояние проблемы; постановка задачи; цель работы; влияние шероховатости металлополимерных пар на их энергонагруженность; математическая модель электротермомеханического контакта микровыступов металлополимерных пар трения "шків-накладка"; особенности компьютерного моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения. Однако решающую роль на формирование энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок оказывают поверхностные и подповерхностные слои обода тормозного шкива и полимерных накладок. Первый является аккумулятором тепловой энергии, а второй – накопителем электрических зарядов.

Состояние проблемы. Полимерами принято называть материалы, имеющие низкую плотность подвижных носителей заряда (ионов и электронов), поэтому удельное электрическое сопротивление таких материалов в $10^{12} - 10^{25}$ раз выше, чем у проводниковых материалов. Очевидно, что полимерными являются материалы с ковалентной, поляризационной или ионной связью между атомами, причем последняя имеет место только в твердом состоянии поверхностного и подповерхностного слоя полимерной накладки. Кроме того, энергия возбуждения электронов на уровне проводимости превосходит 5,0 эВ.

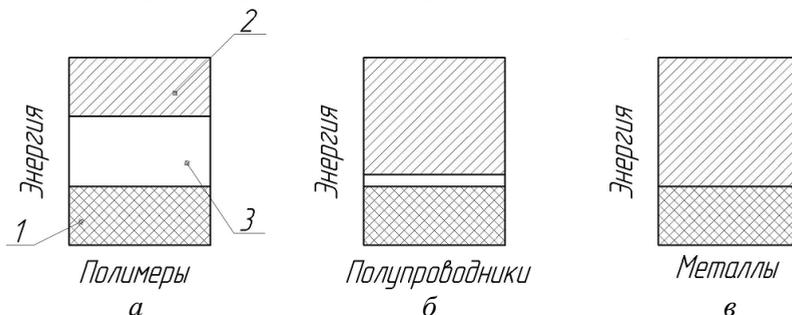


Рис. 1. Энергетическое отличие полимеров от полупроводников и металлических проводников с точки зрения зонной теории твердого тела:

1 – заполненная электронная зона; 2 – зона свободных энергетических уровней;

3 – запрещенная зона шириной Э

Энергетические отличие полимеров от полупроводников и металлических проводников с точки зрения зонной теории твердого тела сводится к следующему (рис. 1). В случае, когда зона запрещенных значений энергии велика (более 5,0 эВ) и электрон может преодолеть ее за счет термического возбуждения, речь идет о полимерах (рис. 1 *а*). Когда зона запрещенных значений энергии невелика, то материалы являются полупроводниковыми (рис. 1 *б*). При перекрытии свободной энергетической зоны с заполненной зоной имеем дело с металлическими проводниками (рис. 1, *в*).

Таким образом, из выше изложенного следует, что запрещенная зона оказывает "сопротивление" зоне свободных энергетических уровней и не дает ей воссоединиться в полимерных и полупроводниковых материалах с заполненной электронной зоной. Однако в полимерных накладках указанное обстоятельство не является основополагающим, поскольку поверхностный слой накладки в зоне температур выше допустимой температуры для ее материалов может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

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

- электростимулированные поляризационные и деполяризационные процессы в поверхностных слоях элементов трения металлополимерных пар;
- зарядно-разрядные свойства различных типов контактов в трибосопряжениях;
- электрический баланс токов в зоне контактов микровыступов пар трения при фрикционном взаимодействии;
- природа разрушения заряда тепловыми импульсами.

Цель работы. Оценка энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки путем применения компьютерного моделирования с учетом механических, электрических и тепловых полей на пятнах контактов их микровыступов.

Электротермостимулированные поляризационные и деполяризационные процессы в поверхностных слоях элементов трения металлополимерных пар. Поляризационные процессы в поверхностных слоях рассмотрим применительно к прямым и обратным металлополимерным парам трения. Прямой парой трения считается такая пара, в которой металлический элемент трения вращается, а полимерная накладка неподвижна. Если металлический элемент трения неподвижен при подвижной фрикционной накладке, то имеем обратную пару трения.

Важнейшим свойством диэлектриков (полимерных накладок) является электрическая поляризация, возникающая под действием электрического поля в результате трения скольжения за счет эффекта электризации. В этом случае имеет место электроиндуцированная поляризация, происходящая под действием внешнего электрического поля с электрическими зарядами частиц, из которых состоит поверхностный слой полимерной накладки. Вследствие этого под действием электрического поля (E) происходит смещение заряда из равновесного состояния (x). При этом в полимерном материале индуцируется электрический

дипольный момент $M_s = \sum_{i=1}^N q_i x_i$, где N – число заряженных частиц рассматриваемого поверхностного слоя полимерной накладки; q_i – электрический заряд i -

той частиці. Единицею измерения величины электрического дипольного момента является «кулон-метр»: $[M\delta]=[Kл/м]$.

Объемная плотность электрического момента называется поляризованностью $P = M\delta/V$, где V – объем поляризованного поверхностного слоя полимерной накладки. $[P] = [Kл/м^2]$ – плотность поверхностного связанного заряда на электроде, т.е. поляризованной поверхности полимерной накладки (рис. 2 а).

Степень поляризованности поверхностного слоя полимерной накладки зависит как от значения электрического поля, так и от структурных особенностей и химического состава ее поверхностного слоя. Очевидно, что поляризованность тем больше, чем выше напряженность электрического поля, определяемая из выражения $E=U/l$, U – электрическое напряжение, приложенное к поверхностному слою накладки толщиной l ; $[E]=[B/м]$.

В общем случае зависимость $P(E)$ может быть сложной (рис. 2 б), но в нашем случае при небольшом электрическом поле связь между P и E можно считать линейной:

$$P = \varepsilon_0 \chi E, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, Φ ; χ – диэлектрическая восприимчивость.

Кроме вектора поляризованности для описания электрической поляризации вводится еще один параметр – электрическая индукция:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2)$$

Индукция имеет те же единицы измерения, что и поляризованность $[D] = [Kл/м^2]$ и также характеризуется поверхностной плотностью электрического заряда на поверхности металлического элемента трения. Если каждый из элементов представить в виде двойных электрических слоев, т.е. как электрический конденсатор (рис. 2 в), то электрическая индукция характеризует полный заряд на обкладках этого конденсатора $D = \rho_n$, в то время как поляризованность P характеризует только ту часть полного заряда, которая связана зарядами противоположного знака, прилегающими к поверхности поляризованного слоя накладки

$$P = \rho_n (1 - \varepsilon^{-1}),$$

где ρ_n – плотность поверхностного электрического заряда на электродах («полимер-металл»).

Параметр ε вводится как коэффициент пропорциональности электрической индукции и напряженности поля

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E. \quad (3)$$

Безразмерный параметр ε – относительная диэлектрическая проницаемость, которая связана с диэлектрической восприимчивостью χ простым соотношением $\varepsilon = 1 + \chi$.

В сильных электрических полях простые линейные соотношения (1) и (2) нарушаются, так как становится существенной диэлектрическая нелинейность (рис. 2 г) $\varepsilon = \varepsilon(E)$, поскольку $\chi = \chi(E)$. В большинстве полимерных материалов нелинейность мала и может учитываться только при воздействии на поверхностный слой полимерной накладки крайне больших электрических полей (10^8 – 10^{10}) В/м (в то время как электрическая прочность $E_{пр}$ твердых полимерных материалов меньше $E_{пр} = (10^7$ – $10^9)$ В/м). Таким образом, в большинстве полимерных материалов электрический пробой наступает раньше, чем в них могла бы заметно проявиться нелинейность.

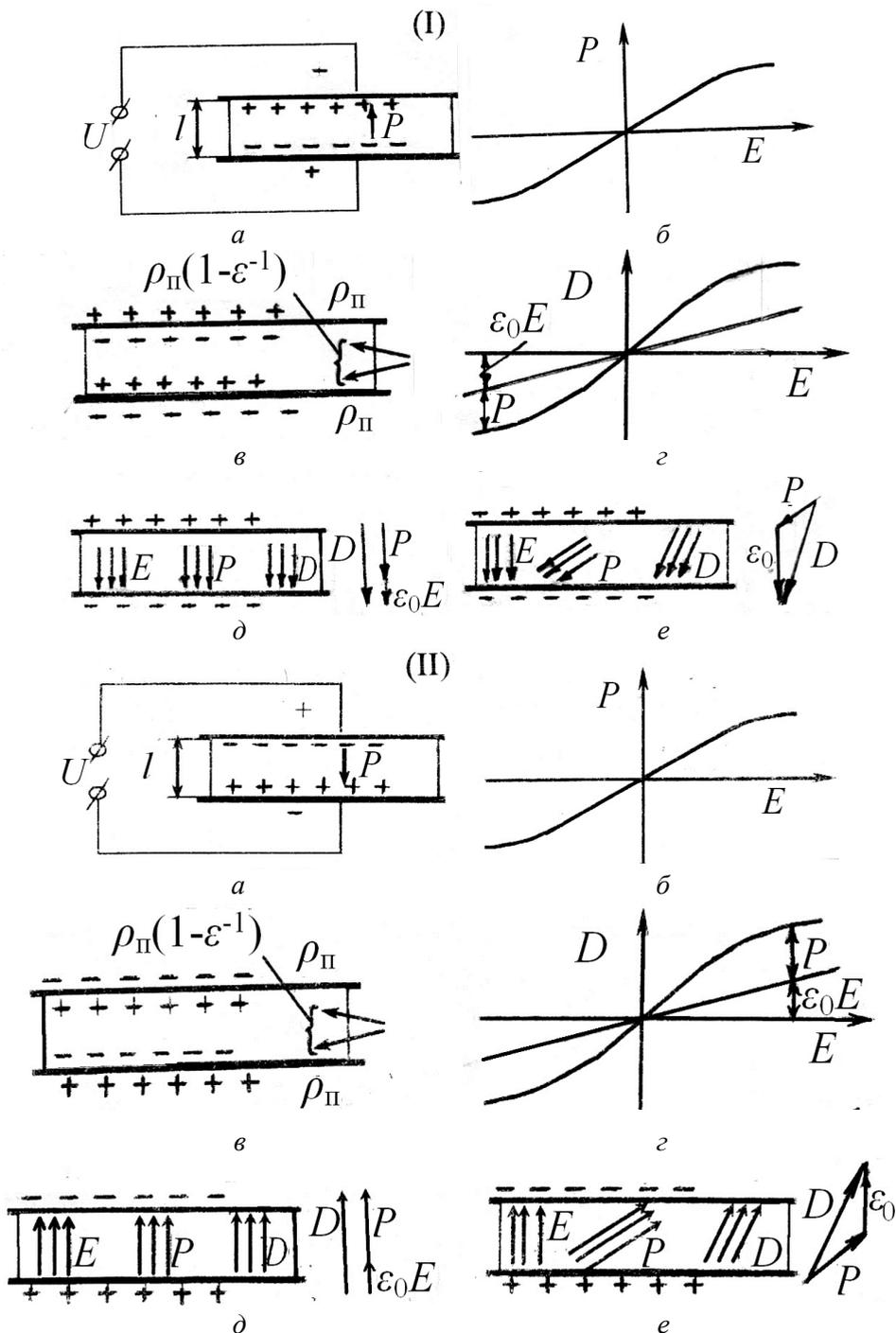


Рис. 2. Макроскопическое описание электрической поляризации в металлополимерных прямых (I) и обратных (II) парах трения при попадании их поверхностных и приповерхностных слоев в различные энергетические зоны

Обратим внимание на то, что напряженность электрического поля E , поляризованность P и электрическая индукция D – векторные величины. В обычных изотропных полимерных материалах векторы D , E и P являются коллинеарными

ми. На рис. 2 *e* показана связь вышеуказанных параметров в электрическом конденсаторе с парами трения «металл-металл», содержащими пленки из полимерного материала.

Направленность векторов D , E и P в анизотропном полимерном материале различна. В соответствии с векторным соотношением имеем:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

Если полимерный материал изотропный, то эта векторная сумма соответствует сумме длин векторов, поскольку направление всех трех векторов совпадает. Напротив, в анизотропном полимерном материале электрическое поле, возбужденное зарядами на обкладках конденсатора и направленное перпендикулярно к этим обкладкам (рис. 2 *e*), индуцирует поляризацию, направленную в соответствии с особенностями упругих связей электрических зарядов анизотропной полимерной накладки, поэтому вектор P не параллелен вектору E .

Суммарный вектор электрической индукции D также отличается по направлению от вектора E , вследствие чего диэлектрическая проницаемость, характеризующая связь между D и E ($D = \varepsilon \varepsilon_0 E$), оказывается особым параметром, зависящим от направления.

Процессами внутренней релаксации заряда в поверхностном слое полимерной накладки управляют явления проводимости. Последние определяются такими характеристиками: подвижностью носителей и их концентрацией; условиями инжекции зарядов на пятнах контакта и т.д.

В полимерных материалах, способных длительно удерживать заряд, присутствуют центры захвата носителей, подвижность которых подавляется процессами захвата. Последние оказывают воздействие и на процессы проводимости. Помимо собственных носителей заряда в поверхностном слое полимерной накладки присутствуют и посторонние носители – инжектируемые электроны в тело выступа контакта металлополимерной пары трения.

При исследовании контактной проводимости на пятне взаимодействия необходимо отличать переходные процессы от стационарных. Это вызвано тем, что при изучении проводимости или подвижности носителей не удастся осуществлять одновременный контроль во времени за распределениями зарядов как в поверхностном слое полимерной накладки, так и на ее рабочей поверхности. Проблема проводимости поверхностного слоя полимерной накладки связана с отсутствием его структурной однородности и чистоты.

На подвижность носителей заряда в поверхностном слое полимерной накладки оказывает влияние наличие в нем различных состояний - свободных (делокализованных) и связанных на мелких и глубоких уровнях захвата, расположенных по толщине накладки. Движение ионов с энергией вблизи поверхности пятна контакта (зоны проводимости) представляет собой квантово-механическое туннелирование между делокализованными состояниями, расположенными по шкале энергии выше предела подвижности. Этот процесс происходит без какой-либо термической активации, и отвечающие ему подвижности зарядов оказываются относительно высокими - около $10 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [1]. Для движения заряда, захваченного мелким уровнем, расположенным по шкале энергии ниже предела подвижности, необходимо определенное количество тепловой энергии, превращенной из электроимпульсной энергии при трении. Процесс движения таких зарядов становится термоактивационным и сводится к последовательным пере-

скокам между локализованными состояниями. В этом случае подвижность зарядов ниже [около $10^2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$]. Время захвата носителей на глубоком уровне оказывается очень большим, а их подвижность становится чрезвычайно низкой [$10^{-10} - 10^{-17} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$].

Во многих полимерных материалах, не обладающих энергетически сильными носителями, их можно создать посредством инъекции из металлического элемента трения через пятно контакта. Если приток носителей вследствие инъекции превышает поток частиц, переносимых через пленку полимера накладки, то происходит ограничение токов полем образующегося пространственного заряда. Величина тока определяется интенсивностью инъекции из металлических пленок пятна контакта.

Диэлектрические потери в приповерхностном слое полимерной накладки, находящемся в переменном электрическом поле при трении, представляет собой рассеиваемую мощность, т.е. энергию, генерируемую электрическим полем.

Различают две причины необратимых потерь энергии электрического поля в приповерхностном слое полимерной накладки на счет:

- нагревания токами сквозной проводимости;
- замедленных видов поляризации.

Согласно закону Джоуля-Ленца протекание тока сквозной проводимости приводит к выделению теплоты в приповерхностном слое накладки, при этом имеют место необратимые потери энергии внешнего поля.

Если поляризационные процессы успевают реагировать на изменение внешнего поля, то сдвиг фаз между напряженностью поля E и поляризованностью P отсутствует (рис. 3 а). В этом случае в течение первой четверти периода поле ориентирует связанные заряды по направлению, совершая работу. Направления поля E и электрического дипольного момента M , совпадают. Кинетическая энергия связанных зарядов растет, что равносильно повышению температуры, т.е. нагреванию приповерхностного слоя полимерной накладки.

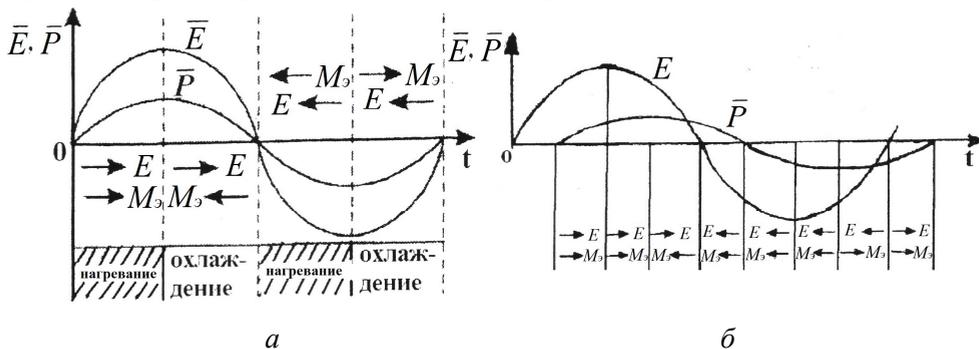


Рис. 3. Поляризация рабочей поверхности полимерной накладки при быстрых (а) и медленных (б) частотах воздействия процессами

Во второй четверти периода направление поля E остается прежним, а поляризованность P уменьшается, т.е. связанные заряды за счет уменьшения E начинают возвращаться в исходное состояние, отдавая накопленную кинетическую энергию, что ведет к понижению их температуры, т.е. охлаждению приповерхностного слоя полимерной накладки.

В течение указанных периодов нагревание компенсируется охлаждением и, таким образом, необратимые потери энергии отсутствуют. Такое состояние при-

поверхностного слоя полимерной накладки носит название установившегося за счет быстрых видов поляризации. В случае медленных видов поляризации наблюдается отставание поляризации от изменения внешнего поля (рис. 3, б). За счет сдвига фаз между напряженностью E и поляризованностью P время нагревания приповерхностного слоя полимерной накладки оказывается большим (длительный режим торможения), т.е. время накопления кинетической энергии больше времени ее отвода в элементы металлополимерной пары трения.

Следовательно, приповерхностный слой полимерной накладки нагревается, и в нем наблюдаются необратимые потери энергии внешнего поля. Потери энергии на ориентацию связанных зарядов равносильны тому, что в поверхностном слое протекает активный ток, обусловленный поляризационными процессами, отстающими от изменений внешнего поля.

Для более углубленного понимания процессов, происходящих в поверхностных и подповерхностных слоях рабочих элементов пар трения с точки зрения их зарядно-разрядных свойств.

Зарядно-разрядные свойства различных типов контактов в трибосопрежении. Рассмотрим контактный, электротермомеханический процесс при соударении микровыступов металлополимерных пар трибосистемы. В результате пластической деформации микровыступов на контактах генерируются электрические токи до тех пор, пока сохраняется их дискретность и фактическая площадь контактирования мала по сравнению с номинальной ($A_r \leq A_o$). Таким образом возникает электрическое поле в результате суммирования составляющих генерируемых токов на пятнах фрикционного контакта. При условии ($A_r \geq A_o$) на пятнах контактов микровыступов в дальнейшем генерируется нестационарный тепловой поток, который вызывает неравномерное температурное поле. Быстрое нагревание, вынужденное и принудительное (при допустимой температуре выше допустимой для поверхностных и подповерхностных слоев полимерной накладки) охлаждение носят аperiодический характер.

Рассмотрим процесс электризации (генерации зарядов) более подробно для двох металлических пленок, одна из которых оказалась на поверхности полимерной накладки в результате массопереноса из металлического фрикционного элемента (рис. 4 а, б). При соприкосновении, т.е. электротермомеханического трения двух металлических пленок между ними устанавливается контактная разность потенциалов ΔV , возникающая вследствие перетекания электронов из металла с более высоким уровнем Ферми Φ_1 (металлический фрикционный элемент) в металл с более низким уровнем Ферми Φ_2 (металлическая пленка на поверхности полимерной накладки) (рис. 4 в, г): $e\Delta V = \Phi_1 - \Phi_2$.

Плотность заряда после разрыва контакта

$$\sigma = (c/A)\Delta V = (\epsilon_o/x^*) (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (4)$$

где x^* - расстояние между пятнами контактов микровыступов, равное примерно (50,0 – 100,0) мкм в отсутствии контакта; c – емкость между пятнами контактов микровыступов и их боковыми поверхностями; A – площадь пятен контактов; ϵ_o – электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

При трении между металлом и полимером в отличие от разрыва контакта между металлами или трения металлов друг о друга (рис. 5) зарядение происходит постепенно при износе пятен контактов микровыступов в результате увеличения и разрыва контактов между "пятнами зарядения"; при этом накапливается большой заряд.

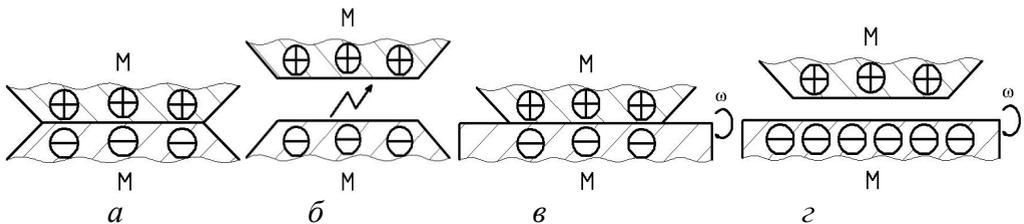


Рис. 4. Накопление электрических зарядов в парах трения ”металл – металл” при статическом (а), фрикционном (б) взаимодействии и разомкнутом их состоянии (б, з)

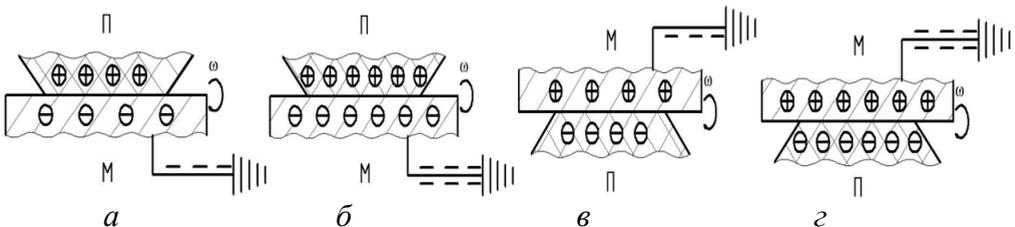


Рис. 5. Накопление электрических зарядов в парах трения ”полимер (П) – металл (М)” (а, б) и ”металл (М) – полимер (П)” в начале (а, в) и в конце (б, з) их фрикционного взаимодействия

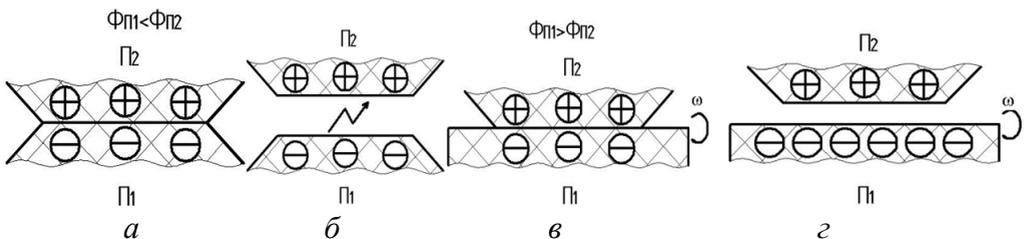


Рис. 6. Накопление электрических зарядов в парах трения ”полимер (П₁) – полимер (П₂)” при статическом (а), фрикционном (б) взаимодействии и разомкнутом их состоянии (б, з)

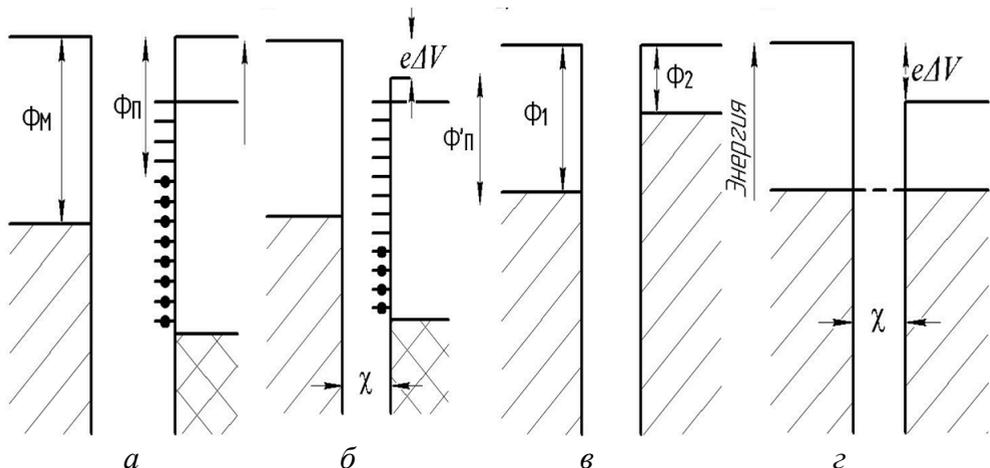


Рис. 7. Схемы перераспределения зарядов (а, б) и электронов (в, з) при установлении контактов между микровыступами металлополимерного трибосопряжения: а – ”металл – полимер” с донорными уровнями на поверхности (б); в – ”металл – полимер” с энергетическими уровнями вакуума и Ферми Φ_1 и Φ_2 (з)

При взаимодействии микровыступов металлополимерного трибосопряжения, когда работы выхода (W) электронов и ионов, соответственно, из металла и поли-

мера будут равны, заряджение может и не происходить. В этом случае полимер называется электрофобным – в отличие от электрофильного, который электризуется при $W_M > W_{II}$ и $W_M < W_{II}$. Электрофильные материалы (при выгорании связующих материалов с поверхностных слоев полимерной наклейки при температурах выше допустимой) на поверхности имеют тонкий слой влаги (т.е. являются гидрофильными), которая, являясь электролитом, облегчает процесс заряджения.

Локальный рост температуры при электротермомеханическом трении превращает поверхностный слой полимера в полупроводник, а электрофобные компоненты материала приобретает способность к заряджению.

Максимальная плотность зарядов при электротермомеханическом трении на пятнах микроконтактов в трибосопряжении достигается очень быстро. В то же время скорость спада зарядов на пятнах микроконтактов изменяется в зависимости от удельного объемного (ρ_v) и поверхностного сопротивления материалов. Причем поверхностная проводимость обычно больше объемной, и поэтому именно ρ_s определяет преимущественно электростатические свойства полимерной наклейки. Заряд на полимерной наклейке спадает примерно по экспоненциальной зависимости

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t/RC), \text{ где } RC = \tau \quad (5)$$

Однако, так как плотность поверхностных состояний ρ_s мала (порядка $10^{16} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$), можно полагать, что $(e^2 \rho_s x / \epsilon_0) \ll 1, 0$, и уравнение (4) упрощается

$$\sigma = e \rho_s (\Phi_M - \Phi_{II}) \quad (6)$$

Согласно зависимости (6) σ на полимерной наклейке прямо пропорциональна уровню Ферми металла, с которым происходит контактирование. В то же время, используя выше приведенную зависимость, можно определить Φ_{II} полимеров, последовательно оценивая количество зарядов при контактировании одного и того же полимера с металлами с разными уровнями Ферми. Такой подход позволяет определить и построить распределение поверхностных состояний полимерных наклеек по энергиям.

При установлении и разрыве контакта между двумя полимерными пленками без трения на них возникает поверхностная плотность зарядов равная

$$\sigma_s = \frac{e(\Phi_{II1} - \Phi_{II2})}{1/\rho_{s1} + 1/\rho_{s2}}, \quad (7)$$

где Φ_{II1} , Φ_{II2} – уровни Ферми поверхностей 1-ой и 2-ой полимерных наклеек; ρ_{s1} и ρ_{s2} – плотности поверхностных состояний полимерных наклеек.

Если $\Phi_{II1} > \Phi_{II2}$, то наклейка 1 будет заряжаться положительно, если $\Phi_{II1} < \Phi_{II2}$ – то отрицательно (рис. 6). Ряд полимеров, расположенных последовательно так, что каждый последующий заряжается отрицательно по отношению к предыдущему при контакте с ним, называется трибоэлектрическим рядом. Положение полимера в трибологическом ряду характеризует его склонность к заряджению положительным или отрицательным зарядом.

При разрыве контакта между двумя заряженными пятнами микровыступов с зарядами $+q$ и $-q$ возникает большая разность потенциалов

$$V = 2q/c = 2ql / \epsilon_0 \epsilon A, \quad (8)$$

(где l – толщина поверхностного слоя) которая может оказаться выше максимально возможной, и тогда происходит искровой разряд между заряженными пятнами микровыступов.

При контакте и завершении фрикционного взаимодействия металла с полупроводниковой пленкой, нанесенной на поверхность полимерной наклейки, происходит такой же процесс, но перераспределение зарядов затрагивает только приповерхностные слои полупроводника. Разность потенциалов, устанавливающаяся между металлом и полупроводником, пропорциональна разнице уровней Ферми в металле Φ_M и в полупроводнике Φ_{III} : $e\Delta V = \Phi_M - \Phi_{III}$. Если полупроводник n -типа, то донорные уровни опускаются на глубину X_0 ; при концентрации носителей n_d образуется положительный объемный заряд $n_d e$ [2]. Изменение потенциала V , который устанавливается и ведет к образованию заряда из-за опустошения уровней, описывается уровнем Пуассона:

$$d^2V / dx^2 = n_d e / \varepsilon_0 \varepsilon.$$

Интегрируя выше приведенное уравнение от поверхности до границы опустошенного слоя, получаем выражение для контактной разности потенциалов:

$$\Delta V = n_d e x_0^2 / 2 \varepsilon_0 \varepsilon.$$

Для типичного неорганического полупроводника $\Delta V = 1,0 \text{ В}$, $\varepsilon = 10,0$ и $n_d = 10^{25} \text{ м}^{-3}$, так что $x_0 \approx 10 \text{ нм}$.

Поверхностная плотность заряда составляет

$$\sigma = n_d x_0 e = \sqrt{2 \varepsilon_0 \varepsilon n_d (\Phi_M - \Phi_{III})}. \quad (9)$$

Считаем, что процессы, происходящие на границе "металл - полупроводник", сходны с процессами на границе "металл - полимер" с той разницей, что в полимере плотность носителей крайне мала. Полагают, что в полимерной наклейке важную роль в электризации играют поверхностные уровни. При контакте с металлом эти уровни опускаются до уровня Ферми металла (рис. 7 а, б). Плотность заряда на поверхности полимерной наклейки составляет

$$\sigma = e \rho_S \Delta \Phi_{II}, \quad (10)$$

где $\Delta \Phi_{II} = \Phi_{II} - \Phi_M$; D_S – плотность поверхностных состояний.

При этом на полимерной наклейке устанавливается новый уровень Ферми $\Phi_H = \Phi_M$. Разность потенциалов между металлом и полимером рассчитывается по формуле

$$\sigma = e \rho_S (\Phi_M - \Phi_{II}).$$

Разность потенциалов ΔV связана с плотностью зарядов σ (при величине заряда x) соотношением $\Delta V = \sigma x / \varepsilon_0$. Таким образом, получаем:

$$\sigma = \frac{e \rho_S (\Phi_M - \Phi_H)}{1 + e^2 \rho_S x / \varepsilon_0}. \quad (11)$$

$$\tau \approx (\varepsilon_0 \varepsilon A / l + C_1) (A / l \rho_V + F / l \rho_S),$$

где F – периметр поверхности контактов; C_1 – геометрическая емкость относительно земли.

Если проводимость определяется объемным сопротивлением, то $\tau = RC = \varepsilon_0 \varepsilon \rho_V$ и

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t / \varepsilon_0 \varepsilon \rho_V). \quad (12)$$

Значение σ быстро уменьшаются, если $t > \tau$, и медленно изменяются во времени, если $t < \tau$. Считается, что значения $\rho_V = 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и $\rho_S = 10^{12} \text{ Ом}$ являются граничными, выше которых полимерные материалы статически электризуются, а ниже – не электризуются. Это соответствует значениям τ около 1,0 с, т.е. заряд,

возникший на поверхности полимерной накладки, за 1,0 с уменьшается в 2,7 раза, а за 2,0 с – примерно в 10 раз.

Согласно формулам (11) и (12) величина электрического заряда зависит от многих факторов: уровней Ферми в материалах трибосопряжения (при электронном механизме заряжения), от скорости скольжения, от концентрации и подвижности ионов (при ионном характере заряжения), диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления поверхностных слоев материалов.

Поскольку плотность зарядов ограничена пробивной прочностью воздуха, находящегося между микровыступами и их боковыми поверхностями (вертикальная и горизонтальная прочность), то уровень электризуемости определяется преимущественно скоростью спада зарядов, равной τ . Так как ϵ меняется относительно мало, то электризуемость определяют по ρ , в частности ρ_s - наименьшей величины, определяющей скорость спада зарядов. Это наиболее распространенный метод определения электризуемости при электротермомеханическом трении пар трения трибосопряжения.

Поскольку спад и измерение токов проводимости в приповерхностных слоях пар трения в трибосопряжении при определении ρ при разных условиях приложения переменного напряжения требует измерения времени релаксации заряда и времени спада заряда.

Электрические заряды образуются при деформировании и разрушении пленок на рабочей поверхности полимерной накладки. Деформирование приводит лишь к перераспределению зарядов в пространстве зазоров между микровыступами трибосопряжения. При этом заряд локализован преимущественно на поверхностях пятен контактов микровыступов трибосопряжения. При этом особое внимание отводится механохимическому явлению, которое имеет место при деформации поверхностных слоев полимерных накладок в твердом состоянии, когда деформация не упругая, а сопровождается сдвигом. При этом происходит разрыв межмолекулярных и зачастую химических связей с образованием микротрещин.

Электрический баланс токов в зоне контактов микровыступов пар трения при фрикционном взаимодействии. Теплота, возникающая в зоне фрикционного контакта тормозных устройств, аккумулируется в приповерхностных слоях фрикционных накладок и в металлическом элементе трения. Закон изменения ее количества уподоблен закономерности изменения величины возникающего в них при трении электрического тока. Рассмотрим электрический баланс токов в зоне фрикционного контакта тормозного устройства.

В табл. 1 приведены значения и направления составляющих общего тока электризации, которые возникают на поверхностях пар трения тормозных устройств в различных зонах теплового состояния их металлического элемента трения [3, 4].

При этом использованы следующие обозначения: $\sum_1^n I_k$ – суммарный ток, возникающий за счет контактной электризации; $\sum_1^n I_m$ – суммарный ток, образованный движением заряженных частиц фрикционного массопереноса; $\sum_1^n I_d$ – суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях контакта; $\sum_1^n I_T$ – суммарный ток, возникающий при контакте

Таблица 1

Смена направлений составляющих тока электризации и его суммарной величины при взаимодействии поверхностей пар трения тормозных устройств в различных зонах энергонагруженности их металлических элементов трения

		Составляющие тока электризации:					Суммарный ток электризации, $\sum_1^n I_\phi$
		I_κ	I_M	I_δ	I_T	I_p	
		Знаки генерируемых токов					
До	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_M > W_n$					
		+	-	0	+	+	$\sum_1^n I_{\phi_+} = \sum_1^n I_\kappa - \sum_1^n I_M + \sum_1^n I_T + \sum_1^n I_p ;$ (13)
После	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_n > W_M$					
		-	+	0	-	+	$\sum_1^n I_{\phi_-} = \sum_1^n I_\kappa + \sum_1^n I_M - \sum_1^n I_T + \sum_1^n I_p .$ (14)
В зоне	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_M > W_n$					
		+	-	±	+	-	$\sum_1^n I_{\phi_+} = \sum_1^n I_\kappa - \sum_1^n I_M \pm \sum_1^n I_\delta + \sum_1^n I_T + \sum_1^n I_p ;$ (15)
В зоне	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_n > W_M$					
		-	+	±	+	+	$\sum_1^n I_{\phi_-} = -\sum_1^n I_\kappa + \sum_1^n I_M \pm \sum_1^n I_\delta + \sum_1^n I_T + \sum_1^n I_p .$ (16)
В зоне	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_M > W_n$					
		+	-	∓	+	-	$\sum_1^n I_{\phi_+} = \sum_1^n I_\kappa - \sum_1^n I_M \mp \sum_1^n I_\delta + \sum_1^n I_T - \sum_1^n I_p ;$ (17)
В зоне	стабилизационного теплового состояния металлических элементов трения	при $W_n > W_M$					
		-	+	∓	+	-	$\sum_1^n I_{\phi_-} = -\sum_1^n I_\kappa + \sum_1^n I_M \mp \sum_1^n I_\delta + \sum_1^n I_T - \sum_1^n I_p .$ (18)

взаимодействующих поверхностей; $\sum_1^n I_p$ – суммарный обратный ток разряда, возникающий при разрушении фрикционного контакта (суммарный импульсный ток); W – работа выхода электронов из полимерной (индекс «n») и металлической (индекс «M») поверхностей элементов трения.

Рассмотрим закон изменения суммарного тока электризации по зонам теплового состояния (см. табл. 1) металлического элемента трения тормозного устройства при двух условиях: $W_M > W_n$ и $W_n > W_M$. В зоне предстабилизационного теплового состояния металлического элемента трения тормозного устройства суммарный ток электризации будет наибольшим в случае приближения пары

трения к указанной зоне при условии, что $W_n > W_m$. При этом суммарные токи $\sum_1^n I_k$ и $\sum_1^n I_m$ будут большими, чем при условии $W_m > W_n$.

Это обстоятельство указывает на то, что при торможениях происходит интенсивное накопление тепловой энергии в металлическом элементе трения, а интенсивность конвективного теплообмена с его матовых поверхностей и радиационного теплообмена низка. Наиболее интересное явление происходит в зоне стабилизационного теплового состояния металлического элемента трения в случае интенсификации сорбционно-десорбционных процессов, происходящих в приповерхностных слоях материала накладок при условии $W_m > W_n$. В этом случае суммарные токи $\sum_1^n I_k$ и $\sum_1^n I_p$ будут большими, чем при условии $W_n > W_m$.

Выгорание связующих компонентов фрикционных материалов является причиной дымления их поверхностей и приводит к образованию на них жидких фракций, что является причиной инверсии теплового потока от матовых поверхностей металлического элемента трения к полированной (рабочей) его поверхности. Это обстоятельство способствует возникновению стабилизационного теплового состояния металлического элемента трения, несмотря на интенсивный радиационный теплообмен с его полированной поверхности. Продолжительность стабилизационного теплового состояния в значительной мере зависит от времени и температуры завершения сорбционно-десорбционных процессов в приповерхностных слоях фрикционных накладок, а также от величины суммарного тока электризации. Значение последнего в зоне с температурой, превышающей стабилизационное тепловое состояние металлического элемента трения, будет минимальным при условии $W_M > W_{II}$.

Исходя из вышеизложенного, условием возникновения термостабилизации металлического элемента трения тормозных устройств является критерий устойчивости трибосистемы $K_y = dW/dT < 0$, $K_y < 0$, где dW – изменение остаточной энергии; dT – изменение поверхностной температуры пар трения тормоза. $dW > 0$ в том случае, если дополнительная энергия термохимической реакции деструкции материала накладки и интенсивность радиационного теплообмена между взаимодействующими поверхностями трения тормоза будет расти быстрее, чем энергия нагружения трибосистемы. Эта энергия определяется величиной работы сил трения.

Воспользовавшись известной формулой Круппа для определения величины плотности контакта заряда [1], можно определить величину I_k применительно к случаю наличия трех видов участка контакта

$$I_k = \frac{d}{dt} (\sigma A_R) = \frac{d}{dt} e \rho_S [(W_M - W_{II}) A_{R1} + (W_O - W_{II}) A_{R2} + (W_{PC} - W_{II}) A_{R3}], \quad (19)$$

где R_1 и A_{R1} , R_2 и A_{R2} , R_3 и A_{R3} – поверхностное сопротивление и площади пятен различных типов контактов: ”полимер – ювенильная поверхность металла”; ”полимер – окисная пленка металла - металл”; ”полимер – переменная пленка полимера - металл”; σ – плотность заряда; W_M , W_{II} , W_O , W_{PC} – работа выхода электрона из металла; полимера; окисной пленки металла; переменной пленки полимера на металл; t – время трения; ρ_S – плотность поверхностных состояний.

При этом предполагается, что плотность поверхностных состояний ρ_S и значения работы выхода электрона W_{II} не являются одинаковыми из-за различных площадей пятен контактов микровыступов полимерной накладки.

Анализ приведенного выражения показывает, что поскольку в большинстве случаев значения $W_O > W_{II}$, $A_{R2} > A_{R1}$ при $(t=0)$, $W_{II} \approx W_{II}$, $dA_{R1}/dt > 0$, $dA_{R3} \geq 0$, а с учетом термоактивированного происходящего с поверхностным слоем металла на его восстановление из окисла [4].

$dA_{R2}/dt < 0$ (для кислотосодержащих полимеров возможно $dA_{R2}/dt > 0$), то величина и направление тока I_k – будет определяться в начальный период при электротермомеханическом трении и зависит от типа контакта ($W_M > W_{II}$ – омический; $W_M = W_{II}$ – нейтральный; $W_M < W_{II}$ – блокирующий) и в каком режиме они работают, т.е. электротермогенератора и электротермохолодильника [5]. При этом немаловажную роль играют зарядно-разрядные свойства пятен контактов микровыступов трибосопряжения. Кроме того, оказывает влияние энергонагруженность поверхностного слоя полимерной накладке, находящегося в зоне температур ниже или выше допустимой для ее материалов. Все это в значительной степени и влияет на направление тока I_k (отрицательное или положительное).

Таким образом, полярность тока контактной электризации I_k будет меняться в динамике процесса электротермомеханического фрикционного взаимодействия вследствие изменения геометрических и энергетических параметров пятен контактов микровыступов трибосопряжения, а также будет зависеть от электрофизических характеристик контактирующих материалов.

Пары трения тормоза взаимодействуют в гиротропной среде и выражены гальвано- и термомагнитным эффектам. Различают следующие эффекты: поперечный и продольный гальваномагнитные и поперечный и продольный термомагнитные [1]. Перечисленные эффекты зависят от напряженности магнитного поля, вызываемой электрическим полем. Закономерности для поперечных и продольных эффектов носят характер линейных и квадратичных зависимостей с учетом того, что в парах трения тормоза наводятся слабые магнитные поля.

Природа разрушения заряда тепловыми импульсами. Работы по формированию наноразмерных структур начинается с реализации эффектов массопереноса между парами трения "полимер - металл" и "металл - полимер" в зависимости от энергетических уровней пятен контактов их микровыступов. Энергетические уровни микровыступов пятен контактов, площади которых увеличиваются к завершению процесса электротермического трения.

Для описания протекающих процессов при разрушении заряда тепловыми импульсами, полагаем, что инжектированные заряды положительны, найдем с помощью уравнения Пуассона

$$\partial E(x, t) / \partial x = \rho(x, t) / \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (20)$$

и воспользовавшись зависимостью вида

$$\varepsilon_0 \varepsilon V(t) = \int_0^S \rho(x, t)(S - x) dx, \quad (21)$$

в котором x и S – функции времени.

В связи с тем, что тепловой импульс вызывают объемное расширение поверхностного слоя полимера, которое оказывается неоднородным, так как возмущение берет начало на заряжаемой поверхности пленки полимера, где возникает тепловой импульс, и постепенно расплывается по всей пленке. Поскольку

ку полный заряд $\bar{\sigma} = \int_0^{s(t)} \rho[x(t), t] dx(t)$ в процессе расширения сохраняется. Зависимость (21) можно переписать в виде

$$V(t) = \bar{\sigma}[s(t) - \bar{r}(t)] / \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (22)$$

где $\bar{r}(t)$ - средняя глубина заряженного облака зарядов пленки.

По изменениям $V(t)$ при $t=0$ и в момент $t=0$, когда тепловой импульс пробьет толщину пленки и ее температура станет всюду одинаковой, можно определить ту среднюю глубину \bar{r}_0 , которая соответствует окончательному расположению зарядов в объеме пленки.

Эта связь имеет вид

$$\Delta V_{t=0} / \Delta V_{t=0} = (s_0 - \bar{r}_0) / s_0 \quad (23)$$

Равенство получаем следующим образом. При $t=0$ разность $s_0 - \bar{r}_0$ изменяется на $\Delta(s_0 - \bar{r}_0)$ вследствие локального расширения в узком слое пленки толщиной l вблизи поверхности $x = 0$:

$$\Delta(s_0 - \bar{r}_0) = \alpha l \Delta T', \quad (24)$$

где α - коэффициент теплового расширения материалов полимерной пленки; $\Delta T'$ - локальное повышение температуры в узком слое пленки.

Это ограниченное в пространстве расширение отводит все заряженное облако зарядов дальше от нижней поверхности пленки.

При $t=0$ расширение пленки уже однородно, поэтому

$$\Delta(s - \bar{r}) = \alpha (s - \bar{r}_0) \Delta T, \quad (25)$$

где ΔT - однородное по объему повышение температуры всей пленки. Предполагая отсутствие тепловых потерь в течение импульса, получим уравнение баланса теплоты в виде

$$l \Delta T' = s_0 \Delta T. \quad (26)$$

Объединяя теперь (24) - (26), приходим к равенству (23).

Вместо теплового импульса для создания локального расширения пленки используется импульс нормальных усилий, который можно определить расчетным путем в импульс удельных нагрузок. Последний метод может применяться как в зарядовых, так и в токовых измерениях, не требует для нахождения распределения зарядов затруднительной процедуры обращения, так как в течение распространения скачка удельных нагрузок через металлический микровыступ (пятно контакта) локальное сжатие одно и то же во всех точках. С другой стороны, методика требует для своего осуществления сложной измерительной аппаратуры [1].

На рис. 8 проиллюстрирована зависимость площадей (A_k) пятен контактов металлических микровыступов и количества (n) от действующих импульсных нормальных усилий (N). Данные зависимости получены аналитическим путем. При этом были использованы следующие данные: характеристики микрогеометрии поверхностей микровыступов над средней линией профиля R_p и максимальный радиус закругления выступов r_{max} ; a - расстояние между микровыступами: физико-механических характеристик материала - модуль упругости E (модуль Юнга), коэффициент Пуассона μ , удельное электрическое сопротивление мате-

риала ρ' , импульсная нормальная сила N , сжимающая контакт [6, 7]. Анализ данных, приведенных на рис. 8 показал следующее:

- увеличение расстояния между микровыступами и площади пятен их контакта при одновременном увеличении их импульсных нормальных усилий способствовало уменьшению удельных нагрузок в зонах пятен контактов;
- количество пятен контактов способствовало увеличению их площадей, и как следствие, уменьшению удельных нагрузок.

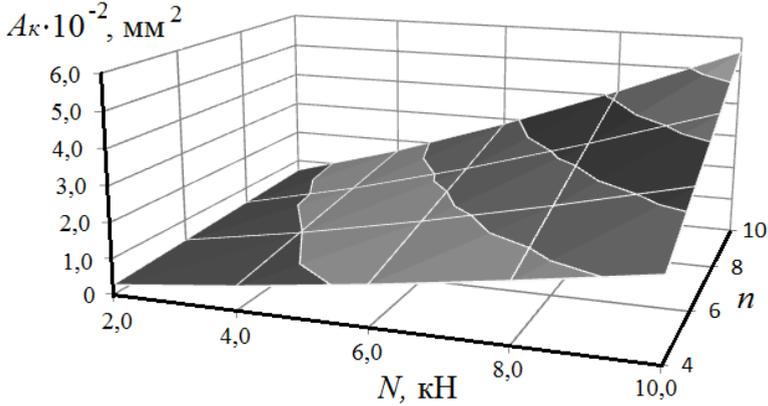


Рис. 8. Зависимость площадей (A_k) пятен контактов металлических микровыступов и их количества (n) от действующих импульсных нормальных усилий

Экспериментальные данные, касающиеся зависимости электродного потенциала (φ_y) от скорости скольжения ($V_{ск}$) и импульсной удельной нагрузки (p), изменяющейся большими ($p_б$) и малыми ($p_м$) скачками на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения, показаны на рис. 9 [8]. Анализ данных, приведенных на рис. 9 показал следующее:

- увеличение скорости скольжения сопровождается увеличением импульсных удельных нагрузок, и как следствие, уменьшением электродного потенциала;

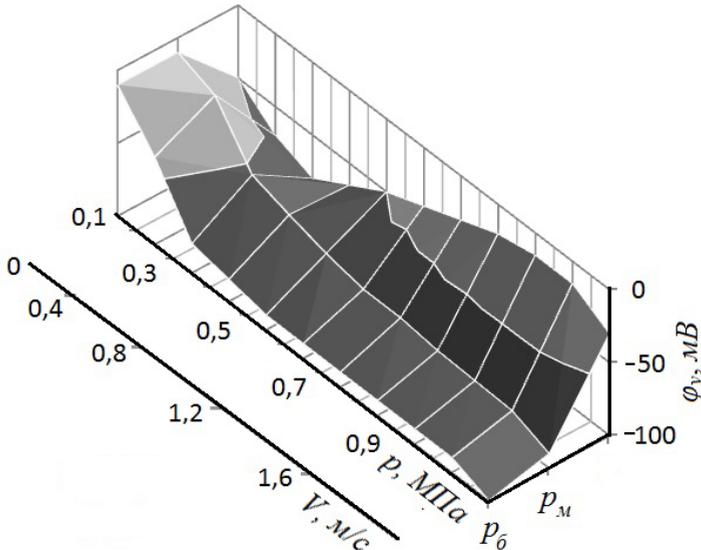


Рис. 9. Зависимость электродного потенциала (φ_y) от скорости скольжения ($V_{ск}$) и удельной нагрузки, изменяющейся большими ($p_б$) и малыми ($p_м$) скачками на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения

- скачки імпульсних удельних нагрузок на пятнах контактів мікроставу-пов сприяють збільшенню електродного потенціала к концу завершення процесу фрикційного взаємодія.

Виводи. Таким образом, в данному матеріалі розглянуто взаємодія електричного і теплового полів на пятнах контактів мікроставу-пов металополімерних пар тертя ленточно-колодочного тормоза бурової лебідки.

Список літератури

1. Сесслер С. Электреты / С. Сесслер. – М.: Мир, 1983. – 481 с.
2. Мамедов Р.К. Контакты металл-полупроводник с электрическим полем пятен / Р.К. Мамедов. – Баку: Госуниверситет, 2013. – 231 с.
3. Патент 2462628 С2 России, МПК F16D 65/82, F16D 51/10. Способ определения направлений составляющих электрических токов в парах трения "полимер - металл" барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков, - заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 19.04.2010; Опубли. 27.09.2012, Бюл. №27.
4. Пат. 2459986 С2 России, МПК F16D 65/82, 51/10. Способ определения составляющих электрических токов в парах трения "полимер - металл" барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях (варианты) / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков, - заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 26.02.2010; Опубли. 27.08.2012, Бюл. №24.
5. Вольченко Д.А. Научные основы управления износо-фрикционными свойствами металлополимерных пар трения тормозов для предотвращения термостабилизационного явления: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.04 / Вольченко Дмитрий Александрович. – Киев, 2012. – 424 с. – на укр. яз.
6. Компьютерное моделирование энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровых лебедок (часть первая) / Д.Ю. Журавлев, С.И. Крыштопа, И.О. Бекиш и др. // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. - №4(65). – 2014. – С.47 – 59.
7. Демкин Н.Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей // Н.Б. Демкин, В.В. Измайлов. Трение и износ. 2010. Т.31. №1. – С.68 – 77.
8. Журавлев Д.Ю. Термодинамический предел поверхностных слоев полимерных накладок при фрикционном взаимодействии / Д.Ю. Журавлев. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков: №2/11(68). 2014. С. 20 – 26.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2014

*М. В. КИДРАЧУК, Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, С. І. КРИШТОПА, Д. Ю. ЖУРАВЛЮВ,
О. Б. СТАДНИК*

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНОСТІ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ СТІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ БУРОВИХ ЛЕБІДОК (частина друга)

Для реалізації комп'ютерної моделі плям контактів мікроставу-пов пар тертя стрічково-колодочного гальма бурової лебідки при фрикційній взаємодії розглянуті особливості електричних та теплових полів.

Ключові слова: контакти мікроставу-пов, плями контактів, зарядно-розрядні властивості, електричний баланс струмів, руйнування заряду, тепловий імпульс.

*M. V. KINDRACHUK, D. O. VOLCHENKO, S. I. KRYSHTOPA, D. Yu. ZHURAVLEV,
O. B. STADNYK*

**COMPUTER SIMULATION OF THE ENERGY LOADING OF THE
METAL-POLYMER FRICTION PAIRS OF THE BAND-SHOE
BRAKES OF THE DRILLING WINCHES**

(part two)

The article examines the peculiarities of electric and thermal fields during the friction interaction in order to implement a computer model of the contact spots of the microprojection friction pairs of the drilling winch band-shoe brake. The main role in the formation of the energy loading of metal-polymer friction pairs of the band-shoe brakes of the drilling winches play surface and subsurface layers of the brake pulley rim and polymer overlays. The first one accumulates thermal energy and the second one accumulates electric charges. Materials with covalent, polarized or ionic cohesion between the atoms are called polymeric. The ionic cohesion takes place only in the solid state of the surface and subsurface layers of the polymer overlay. This point is not fundamental because the overlay surface layer, where the temperature exceeds the allowable temperature, can be in three aggregate states: solid, liquid and gas. The authors consider the polarized processes in relation to direct and reverse metal-polymer friction pairs. A pair where the metal friction element rotates and the polymer overlay is fixed is called a direct pair. When the metal friction element is fixed, it is a reverse pair. The formation of nanoscale structures starts with the usage of the mass transfer effects between the friction pairs "polymer-metal" and "metal-polymer" depending on the energy levels of the contact spots of the microprojections. To create a local layer expansion, the impulse of normal forces is used instead of the thermal impulse. It can be found out by calculating the specific impulse loads.

Keywords: microprojection contacts, contact spots, polarization and depolarization, charging and discharging properties, electric current balance, charge destruction, thermal impulse.

Кіндрачук Мирослав Васильович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73, E-mail: Kindrachuk@ukr.net.

Вольченко Дмитро Олександрович – д-р. техн. наук, професор кафедри розробки та експлуатації нафтогазових родовищ, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, E-mail: rengr@nung.edu.ua.

Криштопа Святослав Ігорович – канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазового технологічного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 03422 72 71 48, E-mail: trans@nung.edu.ua.

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: mechmach@nung.edu.ua.

Стадник Олег Богданович – аспірант кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: mechmach@nung.edu.ua.