

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК<sup>1</sup>, Д. А. ВОЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>, С. И. КРИШТОПА<sup>2</sup>, В. С. СКРИПНИК<sup>2</sup>,  
П. С. КРАСИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Украина

<sup>2</sup>Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

<sup>3</sup>Кубанский государственный технологический университет, Россия

## ГЕНЕРИРОВАНИЕ ТЕРМОЭДС НА ПЯТНАХ КОНТАКТА МИКРОВЫСТУПОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЯВЛЕНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ

*Раскрыта природа источников ЭДС в трибосопряжениях, проиллюстрированы линии тепловых токов с различными материалами пар трения, предложена обобщенная эквивалентная электрическая схема трибосистемы, а также раскрыто влияние электризации на явление переноса в металлополимерных трибосопряжениях.*

**Ключевые слова:** термоЭДС, пары трения: «метал-метал», «полимер-полимер», электрические и тепловые токи, эквивалентная электрическая схема трибосистемы, массоперенос в трибосистеме.

**Введение.** Электротермомеханическое трение и износ металлополимерных пар трения тормозных устройств существенно зависит от характеристик микрогеометрии фрикционного контакта. Поскольку поверхности имеют шероховатость и субшероховатость, а также волнистость, обусловленные характером предварительной технологической обработки, процессом трения и возникающего при этом износом. Кроме того, импульсный контакт на начальной стадии торможения вызывает импульсную нормальную и тангенциальные силы, импульсный динамический коэффициент трения, импульсные электрические и тепловые токи и другие износо-фрикционные параметры. В заключительной стадии фрикционного взаимодействия трущихся поверхностей процессы происходят только на фактической площади контакта, и поэтому сила трения и износ пропорциональны этой площади. Наконец, на электрический и тепловой режим узла трения и на его износо-фрикционные свойства существенно влияет число, размер и плотность распределения пятен фактического контакта. Последние в значительной степени зависят от контактирующих материалов и энергетических уровней их приповерхностных слоев.

**Состояние проблемы.** Остановимся на электрическом поле взаимодействия более детально. При импульсном взаимодействии микровыступов металлополимерных пар трения генерируются следующие токи [1]; суммарный термический ток ( $I_T$ ); суммарный ток, который возникает за счет трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей ( $I_{СК}$ ); составляющую суммарного тока, возникающую за счет трения скольжения ( $I_{ТС}$ ), составляющую суммарного тока, образованную движением заряженных частиц массопереноса ( $I_M$ ); суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях накладки, которые находятся при температуре выше допустимой для ее материалов ( $I_D$ ). В дальнейшем составляющие вышеперечисленных токов в зависимости от направления вращения металлического фрикционного элемента были представлены в виде векторной диаграммы.

Метод определения направлений составляющих генерируемых электрических токов в парах трения «полимер-металл» освещен в [1]. В его основу поло-

жена величина работы выхода электронов и ионов, соответственно, из металлического и полимерного фрикционных элементов. В конечном итоге, экспериментально регистрируемый суммарный ток ( $I_C$ ) электризации с учетом направлений составляющих токов зависит от следующих условий:

$$W_M > W_{II} - I_C = I_{CK} + I_M + I_P - I_T; \quad (1) \quad W_{II} > W_M - I_C = I_{CK} - I_M - I_P + I_T, \quad (2)$$

где  $I_P$  – импульсный (разрядный) ток;  $W_M, W_{II}$  – работа выхода электронов и ионов.

Рассмотрена электродинамика поверхностного и приповерхностного слоя полимерной накладки и указано, что в ее приповерхностном слое протекают активный  $I_a$  и реактивный  $I_r$  токи. Составляющими последнего являются реактивные токи  $I_o$  и  $I_{Pr}$ , обусловленные быстрыми и замедленными видами поляризации, составляющими активного тока является токи сквозной проводимости  $I_{cn}$  и активный ток  $I_{Pa}$ , обусловленный замедленными видами поляризации. Заменяв токи  $I_a$  и  $I_r$  эквивалентной электрической схемой, содержащей идеальные сопротивления  $R$  и емкость  $C$ , которые обеспечивали протекание указанных токов. Идеальные  $R$  и  $C$  соединены параллельно (рис. 1, а).

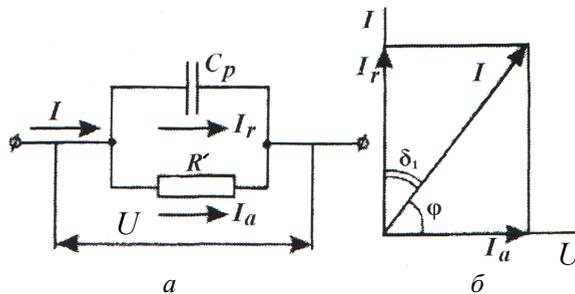


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) параллельного замещения приповерхностного слоя полимерной накладки

Условиями эквивалентности схемы замещения реальному приповерхностному слою полимерной накладки является равенство:

- сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$  в реальном слое и в схеме замещения (угол сдвига фаз  $\varphi$ );
- мощностей, выделяемой в схеме замещения и теряемой в приповерхностном слое реальной полимерной накладки.

Рассмотренная схема замещения аналогична схеме податливости фрикционного стыка металлополимерной пары трения, поскольку микровыступы между собой также параллельны. Векторная диаграмма токов и напряжений для параллельной схемы замещения (рис. 1, б) позволяет рассчитывать  $\text{tg}\delta_1$  и мощность, теряемую в приповерхностном слое полимерной накладки. Однако в данной работе не была приведена обобщенная эквивалентная электрическая схема трибосистемы с учетом наличия в ней третьей фазы.

В работе [2], посвященной контактно-импульсному взаимодействию материалов типа «металл-металл» и «полимер-полимер» в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, выполнен анализ линий теплового тока для указанных пар трения. Однако в данной работе не было рассмотрено действие линий теплового тока и изотерм при фрикционном взаимодействии контактов пар трения: «металл – металлическая пленка – металл», «металл – полимерная пленка – металл» и «полимер – металл», которые оказывают существенное влияние на энергонагруженность пятен контактов микровыступов пар трения тормозных устройств.

**Постановка задачі.** В даній публікації розглянуті наступні питання застосовано до досліджуваної проблеми:

- лінії теплового току і виникаючі ізотерми при взаємодії контактів пар трення із різних матеріалів;
- основні джерела ЕДС в трибоспряженнях;
- узагальнена еквівалентна електрична схема трибосистеми;
- вплив електризації на явище масопереносу в металополімерних трибоспряженнях.

**Ціль роботи.** Оцінити джерела ЕДС і встановити вплив електризації на явище масопереносу в трибоспряженнях.

**Лінії теплового току і виникаючі ізотерми при взаємодії контактів пар трення із різних матеріалів.** Многочисленними дослідженнями встановлено, що площа фактичного контакту становить незначительну частину номінальної площі контактної-імпульсної взаємодії, визначеної їх геометричними розмірами. Відсутність сплошності контакту при соприкосновении пари трення «металл-металл» суттєво змінює картину течії теплоти від першого елемента пари до другого. При низькій мікропорої, між плямами контактів, і слабким лучистим теплообміном, передача теплоти відбувається тільки через місця фактичного контактування, плями якого мають різний опір. Тому по мірі наближення до поверхні опору (плями контакту) лінії теплового току стягуються до плям фактичного контакту, що веде до збільшенню густоти теплового потоку, про що свідчить рис. 2, а. При цьому вважаємо, що контакт відбувається по вершині виступів мікронерівностей і з урахуванням того, що для більшості реальних контактів, розташованих дискретно, подовжні сечення зазору між ними значно більше поперечного. Останнє обставина дозволяє знехтувати подовжньою теплопровідністю середовища в зазорі, а також ефективністю її вимушеної конвекції. Що стосується лучистого теплообміну з поверхнями порожнин між плямами контакту то він теж не враховувався.

На плямі контакту спостерігається рівність поверхневих температур, оскільки поверхні, обмежуючі порожнини мікрорівностей, не є ізотермічними, і їх температури відрізняються від температури на площадках плям фактичних контактів. Виникаючий градієнт температур забезпечує передачу теплоти за рахунок теплопровідності середовища (викликаній імпульсними іскровими електричними розрядами), що знаходиться в порожнинах між мікрорівностями. По мірі збільшення провідності середовища в зазорах інтенсивність стягування ліній теплового току до плям фактичного контакту ослабжується, флуктуації густоти теплового потоку по поверхні вирівнюється і при досягненні однакової провідності середовища і матеріалів плями контакту густота теплового потоку стає рівномірною.

На рис. 2, а виділені «граничні» лінії току, що відокремлюють область основного теплового потоку, що йде через площадку фактичного контакту, від області додаткового теплового потоку, що йде через проміжну середовище в зазорі між мікрорівностями. В парі трення «металл-металл» спряження має місце рівність густот теплового потоку і температур на границях різних серед.

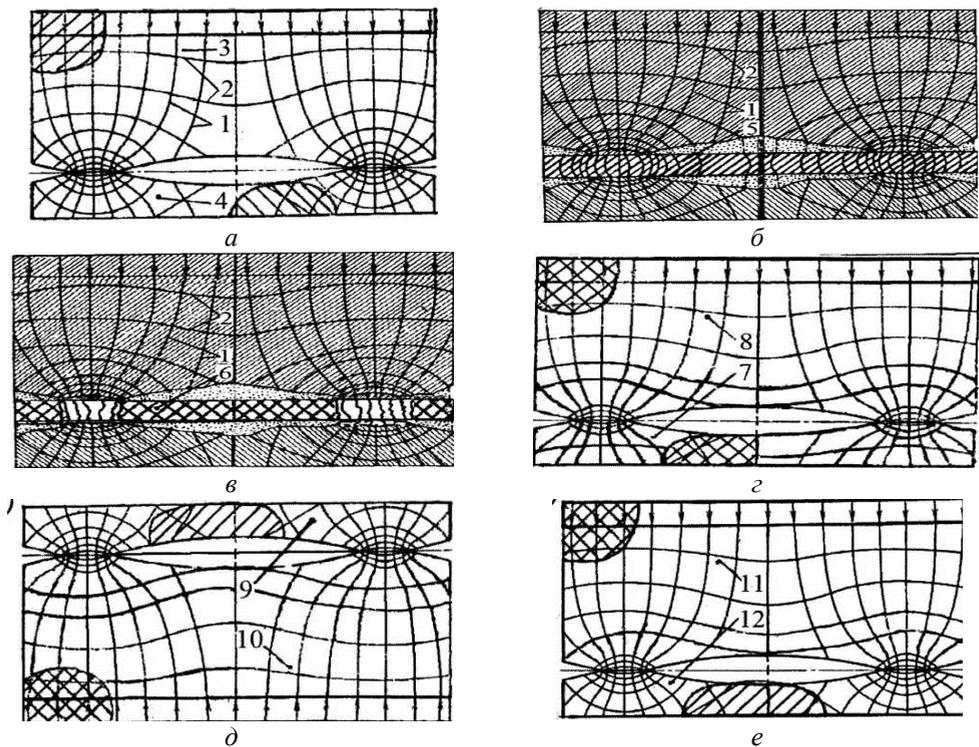


Рис. 2. Линии теплового тока (1) и изотермы (2) при фрикционном взаимодействии контактов пар трения: а – «металл (3) – металл (4)»; б – «металл (3) – металлическая пленка (5) – металл (4)»; в – «металл (3) – полимерная пленка (6) – металл (4)»; г – «полимер (7) – полимер (8)»; д – «металл (9) – полимер (10)»; е – «полимер (11) – металл (12)».

Электризация поверхностей полимерной накладке и полимерной пленки, осуществляется за счет массопереноса на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента при контактно-импульсном взаимодействии друг с другом, является суммой двух эффектов, кинетического и равновесного (рис. 2, а). Кинетический эффект вызван тем, что металлический фрикционный элемент с полимерными пленками на своих рабочих поверхностях вращается, а рабочая поверхность полимерной накладки является неподвижной. В этом случае вызывающий электризацию кинетический эффект связывают с тем, что взаимодействующая пленка металлического фрикционного элемента нагревается больше, чем неподвижная полоса поверхности полимерной накладки. Для изучения пары трения «полимер-полимер» (рис. 2, г) большое значение имеет равновесный эффект. Этот эффект возникает на начальной и конечной стадиях контактно-импульсного взаимодействия двух полимерных пятен контакта и при этом пленка металлического фрикционного элемента является частично изношенной.

Изучение контактной электризации в вакууме (иногда вакуум возникает между взаимодействующими парами трения в ленточно-колодочном тормозе) при температурах ниже допустимой для материалов полимерной накладки позволяет исключить влажность циркулирующего воздуха, и указывает на то, что она обусловлена передачей ионов от одной к другой пленке и наоборот. Отмеченный процесс описывается с помощью работы выхода - величины, широко используемой в теории металлов и полупроводников, применяя ее также и к полимерам.

Предположим, что положительные заряды (ионы) однородно распределены

в полимерной накладке с объемной плотностью  $\rho$  до глубины  $\delta$ , что позволяет сформировать поверхностную плотность заряда  $\sigma = \rho\delta$  и среднее поле напряженностью  $\sigma/2\varepsilon_1\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость материалов первой и второй пленки). Приравнявая последнее к полю  $\Delta W/e\delta'$ , обусловленному различием в работах выхода  $\Delta W$  двух ограничивающих область заряда поверхностей (макро и микроучастков), определим плотность введенного заряда с помощью зависимости

$$\sigma = 2\varepsilon_1\varepsilon_2\Delta W / e\delta'. \quad (3)$$

В зависимости от различных гипотез о захвате носителей первой и второй полимерной пленкой, имеющих разную подпитку носителей в процессе их контактно-импульсного взаимодействия, прогнозируется различная связь  $\delta$  с  $\Delta W$ . Например, если глубина  $\delta'$  залегания зарядов в приповерхностном слое полимерной накладки не зависит от  $\Delta W$ , то такая связь является линейной. Данное условие устанавливает определенную зависимость  $\Delta W$  от объемной плотности  $\rho$ . Все зависит от количества уровней захвата рассматриваемых участков поверхностей двух полимерных материалов. Если имеется лишь один дискретный уровень захвата, то плотность  $\rho$  является постоянной и вместе с зависимостью  $\delta = \sigma/\rho$  приводит к зависимости вида

$$\sigma = \sqrt{2\varepsilon_1\varepsilon_2\rho\Delta W} / e^*. \quad (4)$$

Выведенная зависимость (4) имеет сходство с зависимостью, которая установлена В. Харпером.

Таким образом, для поверхностной электризации пары «полимер-полимер» в большинстве случаев имеет место линейная зависимость.

На рис. 3, а приведена зависимость плотности зарядов  $\sigma$  от контактной разности потенциалов  $\Delta\phi$  для пары трения «полимер-полимер» (типа PTFE, где P – полимер, TFE – сополимер).

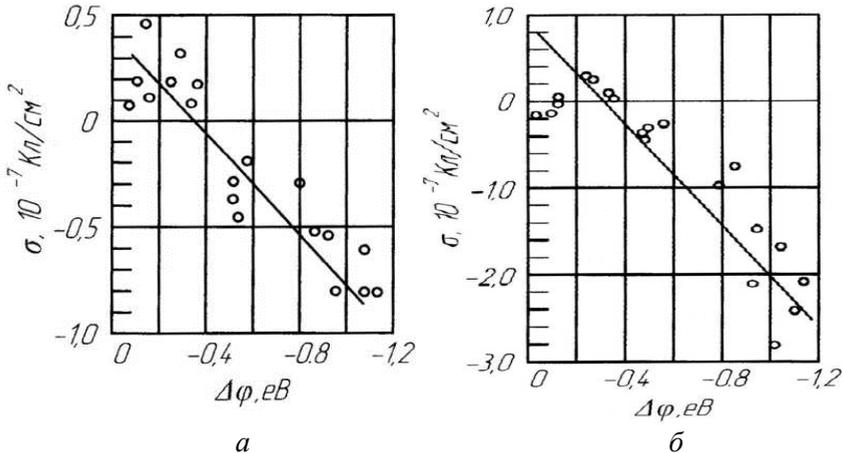


Рис. 3 а, б. Зависимость плотности зарядов  $\sigma$  от контактной разности потенциалов  $\Delta\phi$  для пар: трения «полимер-полимер» (типа PTFE P – полимер; TFE - сополимер по данным Г. Сессера) [а] и «металл-металл» (разные металлы составляют поликарбонат по данным Г. Сессера) [б].

Как указывалось ранее, линейная закономерность объясняется постоянством глубины проникновения или однородностью энергетического распределения уровней захвата. Последнее, однако, у полимеров обычно не обнаруживается и в то же время постоянство глубины проникновения не удается увязать с физиче-

скими моделями объемных уровней захвата. Нелинейные данные для полимерных материалов типа PTFE интерпретировались на основе того, что полимер с объемным распределением заряда создает такое же внешнее поле, как и полимер с поверхностными зарядами, плотности которых равны  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Данное условие является сомнительным.

На рис. 3, б проиллюстрирована зависимость плотности зарядов  $\sigma$  от контактной разности потенциалов  $\Delta\phi$  для пары трения «металл-металл» (различные металлы составляют поликарбонат). При этом данные для поликарбоната показывают пропорциональность между  $\sigma$  и  $\Delta\phi$ .

При рассмотрении эффекта искривления зон вблизи контакта «металл-полимер» возникает следующая картина: при однородном распределении уровней захвата в запрещенной зоне поверхностной плотности заряда  $\sigma$  пропорциональна разности работы выхода  $\Delta W$ , если же ловушками служат отдельные дискретные уровни, связь  $\sigma$  с  $\Delta W$  может колебаться от экспоненциальной в полимерной накладке, вообще не имеющей ловушек, до квадратичной в полимерной накладке с полностью ионизированными ловушками

Как метод получения полимерных материалов контактная электризация широко не применяется главным образом из-за отсутствия точной воспроизводимости. Это явление необходимо учитывать в парах трения «металл-полимер» или при взаимодействии металла с другими полимерными материалами поскольку это вызывает эффект нежелательной электризации, который как теории, так и практики всегда стремятся подавить.

Что касается линий теплового тока (1) и изотерм (2) при фрикционном взаимодействии контактов пар трения: б – «металл (3) – металлическая пленка (5) – металл (4)»; в – «металл (3) – полимерная пленка (6) – металл (4)»; г – «полимер (7) – полимер (8)»; д – «металл (9) – полимер (10)» (рис. 2, б–д), то здесь важно отметить следующее:

– электростимулированные поляризационные и деполаризационные процессы в поверхностных слоях элементов трения типа «в», «г» и «д» будут происходить интенсивно, поскольку поверхностные и подповерхностные слои полимерных накладок являются накопителями электрических зарядов;

– тип пары трения «б» является наиболее регулируемым в тепловом плане из-за одинаковой его структуры.

Для процессов нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства контактов взаимодействия.

На рис. 4 условно показано различие между нейтральными, омическими и заблокированными контактами. Нейтральные контакты не препятствуют нейтрализации зарядов, поступающих из приповерхностного слоя металлического элемента трения в течение термостимулированного разряда. То же можно сказать и об омических контактах, хотя в этом случае добавляется возможность инъекции носителей противоположного знака внутрь заряженной поверхности накладки. Блокирующие контакты действуют противоположным образом: они препятствуют как инъекции, так и нейтрализации зарядов. Таким образом, если контакты заблокированы, нейтрализация должна протекать внутри металлического элемента трения независимо от вида контакта (является он инжeksiрующим электроны или блокирующим). Это зависит лишь от того, какая из работ выхода электронов или ионов больше: металлического или полимерного фрикционного элемента. Если работа выхода из первого элемента больше, чем

со второго образуется блокирующий барьер. Наличие последнего позволяет изучать методом термостимулированного разряда полуизоляторы и полупроводники, которым свойственны большие токи проводимости.

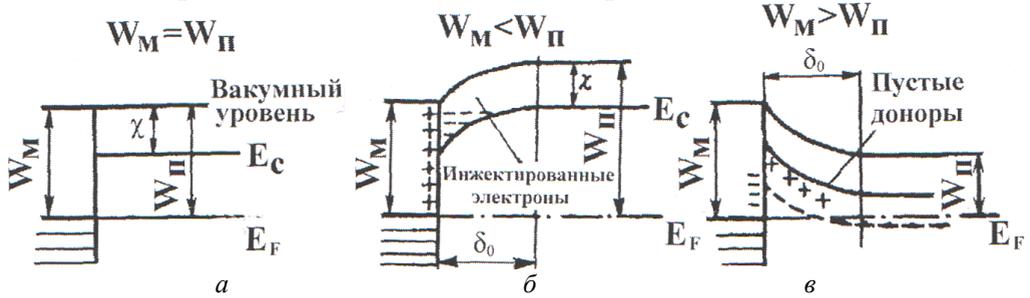


Рис. 4. Энергетические уровни взаимодействующих пар трения «металл-полимер» с различными типами контактов: *a* – нейтральный; *б* – омический или инжектирующий; *в* – блокирующий:  $E_C$ ,  $E_F$  – энергетические уровни: критического движения, Ферми;  $W_M$ ,  $W_P$  – работы выхода электронов и ионов из металла и полимера;  $\delta_0$  – толщина обогащенного (*б*) и обедненного (*в*) электронами слоя;  $\chi$  – электронное сродство.

**Основные источники ЭДС в трибосопряжениях.** Довольно широко известен тот факт, что вследствие интенсивного нагревания микровыступов пар трения при электротермомеханическом трении, зона их непосредственного контакта может рассматриваться как горячий спай естественной термопары. Запись электродвижущей силы, генерируемой в подобном термоэлементе (рис. 5 по данным С.Н. Постникова) позволила получить информацию о поверхностной температуре на пятнах контактов микровыступов, а иногда и о температуре вспышки, и о поведении деформируемых их площадок при относительном скольжении металлического фрикционного элемента. В предложенных методиках тарирования естественных термопар предусмотрено устранение паразитных токов в замкнутых измерительных контурах.

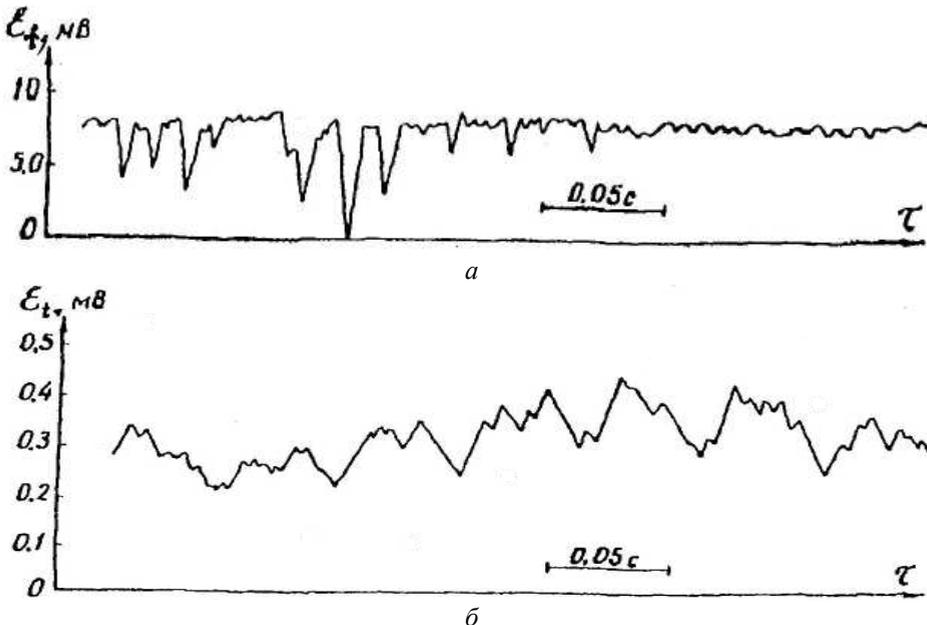


Рис. 5. Осциллограммы термоЭДС трибосопряжений: *a* – константан-медь; *б* – высокоуглеродистая сталь – низкоуглеродистая сталь

Электрический параметр, таким образом, выступает в качестве чувствительного индикатора, и уже а priori было ясно, что через посредство электрических явлений можно определять не только интенсивность нагревания трущихся микровыступов пар трения, но и оценивать процессы поляризации и деполяризации их поверхностей, вклад электрических явлений в общий баланс мощности трения и их влияние на износо-фрикционные характеристики поверхностных и подповерхностных слоев трибосопряжения. Таким образом, возникает необходимость оценки термоэлектрических явлений и их собственного, самостоятельного влияния на процессы электротермомеханического трения с учетом того, что первой компонентой интегральной ЭДС является ее термоэлектрическая составляющая.

Как было показано авторами [1; 2; 3 и др.] изучение на нано-, микро- и макроуровнях электрических явлений при электротермомеханическом трении способствовало формированию термоэлектробатарей, работающих в режимах термоэлектродвигателей и термоэлектрорефрижераторов; определению составляющих электрических токов, а также к применению синтеза схем нелинейных электрических цепей с переменными параметрами, отвечающих любому из элементарных актов фрикционного взаимодействия.

Пусть четыре микровыступа шероховатостей, принадлежащих физико-химически чистым поверхностям, находятся попарно в состоянии непосредственного контакта при относительном скольжении одного из фрикционных элементов, внутренний термоэлектрический контур, образующийся в этом случае, показан на рис. 6.

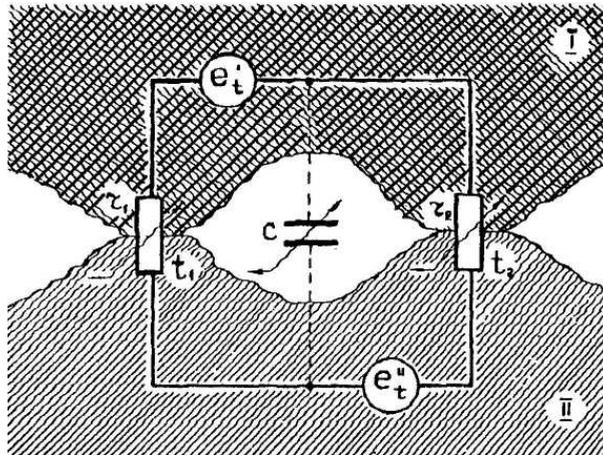


Рис. 6. Элементарная контактная ячейка и схема ее термоэлектрической цепи при трении пары «полимер (I) – металл (II)»

В схему на рис. 6 включена нелинейная параметрическая емкость  $C$ . Ее величина зависит от расстояния между микровыступами пятен контактов, диэлектрической проницаемости среды, заполняющей межфазное щелевое пространство. Дифференциальная емкость и «одновитковая» индуктивность контура (на рис. 6 не показана) характеризуют состояние электромагнитного поля фрикционного конденсатора.

При электротермомеханическом трении в большинстве случаев температуры в обеих зонах реального контакта неодинаковы ( $t_1 \neq t_2$ ) и в «замкнутой» электрической цепи, составленной из проводников I и II ( $r_1, r_2$  – сопротивления областей стягивания), будет действовать термоэлектродвижущая сила  $e_t$ .

Согласно квантовой теории нет оснований ожидать появления сколь угодно значительной по величине термоЭДС в случае ювенальных поверхностей, поскольку очень мал или совсем отсутствует «вклад» каждого из источников, которые ее вызывают, а именно:

- разность контактных потенциалов на «микроспаях» равная разности электронно-ионных работ выхода;
- температурная зависимость кинетической энергии (подвижности) носителей заряда;
- различие концентраций свободных электронов.

Но если контактирующий металл окислен, то, учитывая полупроводниковые свойства оксидных пленок, следует иметь в виду их способность играть роль своеобразных усилителей термоэлектрических эффектов в местах наибольшего сближения конденсированных фаз. В этом случае к анализу термоэлектрических явлений при трении применима классическая статистика Больцмана. Низкая теплопроводность окислов (высокие градиенты температур на пятнах контактов микровыступов) обуславливает появление при электротермомеханическом трении довольно значительных токов вихревого характера, которые в свою очередь могут способствовать локализованному выделению теплоты.

Электродвижущие силы, создаваемые разностью потенциалов в обеих ветвях контура, могут действовать как встречно (при разном механизме проводимости у полимера *I* и металла *II*) так и согласовано (цепь составлена из электронного и дырочного проводников). Поэтому общая термоЭДС контура

$$e_t = e'_t + e''_t. \quad (5)$$

Через реальный контакт протекает целая совокупность петлеобразных термоэлектрических токов  $i_1, i_2, \dots, i_n$  (рис. 7). На поверхностях поликристаллических металлов могут протекать также местные микротоки вследствие разности работ выхода у кристаллических граней.

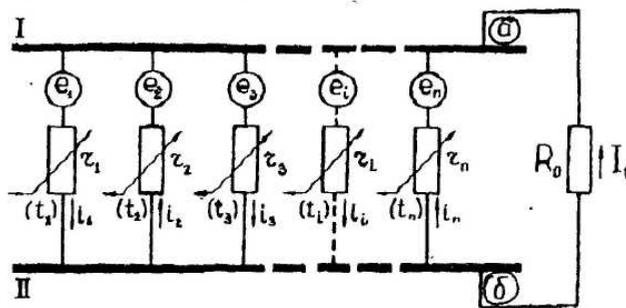


Рис. 7. Внутренние и внешняя термоэлектрические цепи пар трения

Л.А. Лебедев обратил внимание на то обстоятельство, что, говоря о реальном контакте твердых тел при трении, необходимо учитывать его важную особенность, на которую указал Я.И. Френкель и которая должна найти отражение в эквивалентных схемах. Дело в том, что электрический ток может протекать как через участки поверхностей пятен контактов, сближенных до межатомных расстояний порядка нескольких ангстрем, так и удаленных друг от друга на расстояния до 30 Å. Если источниками ЭДС считать только первые участки, то во внутренней цепи контакта должны быть показаны нагрузочные сопротивления, соответствующие туннельной проводимости (на вторых участках, когда электроны проходят через потенциальный барьер, энергия которых меньше высоты

барьера). На схемах на рис. 6 и 7 эти сопротивления не выделены лишь по той причине, что рассматривается область скольжения не только как термоэлектрическая, но и как термоэлектронный преобразователь, т.е. в том числе и как специальный термоэлектрический преобразователь. Другими словами, в термоэлектрической составляющей интегральной ЭДС учитывается и ее термоэлектронная компонента. Больше того, здесь уместно было бы говорить о роли смешанной электронной эмиссии, памятуя о том, что одни и те же разные участки поверхности могут служить источниками термоэлектронов, экзлектронов, автоэлектронов и пр.

Общее сопротивление дискретного контакта микровыступов пар трения

$$R_m = 1 / \sum \frac{1}{r_i}, \quad (6)$$

где  $r_i$  ( $i = 1; 2 \dots n$ ) – сопротивление одной из областей стягивания. Горячий спай естественной термопары представляет собой несколько термопар, включенных параллельно. Если внешняя цепь пары трения замкнута на переходное сопротивление  $R_0$  и  $e_i$  ( $i = 1; 2; \dots; n$ ) – электродвижущая сила внешнего контура  $r_i - R_m$  то мгновенное усредненное значение результирующей термоЭДС

$$\xi_t = \sum_{i=1}^n e_i g_i / \sum_{i=1}^n g_i. \quad (7)$$

где  $g_i$  ( $i = 1; 2 \dots n$ ) – проводимость  $i$ -й области стягивания.

Суммарный термоток

$$I_t = \xi_t / (R_m + R_0). \quad (8)$$

Если принять, что абсолютные коэффициенты Зеебека  $\alpha_I$  и  $\alpha_{II}$  являются постоянными, поэтому в зависимости от типа проводимости материалов удельная термоЭДС пары равна  $\alpha = \alpha_I \pm \alpha_{II}$ ; при том, что  $\xi_t = \alpha \Delta T$ .

Общеизвестно, что проводимость  $n$ -типа обусловлена валентными электронами, которые в возбужденном состоянии могут свободно переходить на незанятые энергетические уровни, расположенные несколько выше уровня Ферми. В то же время металлы с почти заполненной валентной зоной обладают проводимостью  $p$ -типа, т. е. основными носителями заряда в них являются вакантные энергетические уровни в распределении Ферми («дырки»). Чисто дырочный механизм проводимости наблюдается у вольфрама, молибдена, цинка и некоторых других металлов. Что касается механизма проводимости сплавов, то он, очевидно, определяется процентным содержанием и типом собственной проводимости химических элементов, входящих в их состав. Как правило, сплавы имеют смешанный характер проводимости, однако в каждом из них преобладает  $n$ - или  $p$ -тип, что легко определяется по знаку и величине термоЭДС при различных сочетаниях материалов.

Весьма интересным является вопрос о действии еще одного источника ЭДС, роль которого, как правило, не учитывается при определении температуры поверхностных слоев методом естественной термопары. Речь идет о так называемом акустоэлектрическом эффекте, т. е. о появлении ЭДС вследствие увлечения носителей электрических зарядов волнами вызванными механическими напряжениями. В квантовой теории, как известно, этим волнам сопоставляются фононы.

Впервые, рассматривая этот вопрос применительно к трению, Л.А. Лебедев исходил из того положения, что «деформируемые» участки пятен контактов микровыступов являются источниками упругих и пластических волн. Качественный анализ задачи он проводил на примере распространения плоских волн

от границы раздела без учета явлений отражения и интерференции. Воспользовавшись феноменологической формулой Г. Вайнрайха для напряженности акустоэлектрического поля получаем

$$E = \mu \alpha_{II} I / \gamma v, \quad (10)$$

и считая, что интенсивность плоских волн убывает в направлении их распространения по закону

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (11)$$

получено следующее выражение для разности потенциалов между точками с координатами  $x_1$  и  $x_2$ :

$$U_{12} = \frac{\mu \alpha_{II}}{\gamma v \alpha} \cdot I(x_1) \left[ 1 - e^{-\alpha(x_2 - x_1)} \right] \quad (12)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда;  $\alpha_{II}$  – коэффициент затухания волн при взаимодействии с носителями заряда;  $\gamma$  – электропроводность материала;  $v$  – скорость волн;  $\alpha$  – коэффициент затухания волн в материале.

Поскольку при трении возникают колебания и волны имеют различные частоты, то разности потенциалов, определенные для всех составляющих спектра с учетом изменений акустоэлектрических свойств материала, должны быть, конечно, алгебраически просуммированы. Аналогичный подход предлагается использовать и при расчете разности потенциалов между сопряженными телами, т. е. фактически акустоЭДС  $\xi_a$ .

Ясно, что интенсивность волн напряжений, а следовательно, и величина  $\xi_a$  зависят от тех факторов, которые определяют характер и природу процессов фрикционного взаимодействия. От этих же факторов зависят и частоты механических волн звукового диапазона, что следует из результатов гармонического анализа спектра колебаний импульсной силы трения.

Рассмотрим теперь акт взаимодействия пары трения «металл-полимер» в присутствии электропроводной жидкости, образовавшейся в связи с выгоранием связующих компонентов из поверхностных слоев полимерной накладки. Участие электролита в качестве щелевой капиллярной прослойки приводит к образованию скачков потенциала на границах «металл – раствор» (рис. 8). Как правило, величины  $\varphi_{III}$  и  $\varphi_{III}$  таковы, что их алгебраическая сумма не равна противоположной контактной разности потенциалов  $\varphi_{II}$ .

Другими словами, имеем короткозамкнутый гальванический микроэлемент, что создает потенциальную возможность для протекания на его электродах окислительно-восстановительных реакций.

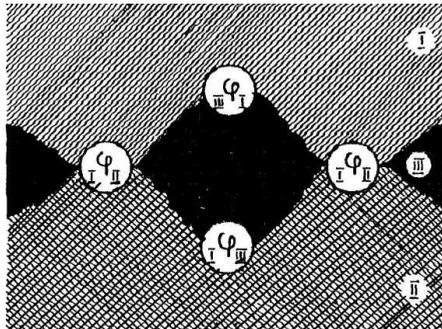


Рис. 8. Замкнутый участок системы «металл (I) – электролит (III) – накладка (III)»

Электродвижущая сила элемента

$$e_g = I\Phi_{III} - II\Phi_{III} - I\Phi_{II}. \quad (13)$$

При относительном скольжении металлической поверхности наряду с гальваноЭДС будет действовать и термоэлектродвижущая сила (рис. 8), оказывающая, по-видимому, влияние на скорость электродных реакций, межфазовое (поверхностное) натяжение и т. д.

С.Н. Постников в свое время подчеркивал, что в схеме на рис. 9 не показаны электрические емкости, которые имеют поверхности раздела между пятнами контактов трибосопряжения и раствором электролита (электрические двойные слои), их сопротивления утечки, емкость между двумя электродами. Все это было учтено И.М. Мельниченко при разработке уточненной эквивалентной схемы фрикционного контакта применительно к случаю трения в условиях избирательного износа и массопереноса.

При одинаковом электрохимическом поведении металла по всей поверхности и наявности, контактирующих островков ЭДС гальваноэлемента

$$\xi_g = \xi^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_2^{1/n_2}}{a_1^{1/n_1}}, \quad (14)$$

где  $\xi^0 = \xi_2^0 - \xi_1^0$  – ЭДС элемента при активности ионов  $a_1 = a_2 = 1$ ;  $n_1, n_2$  – заряды ионов.

Усредненная величина  $\xi_g$  определяется как разность электродных потенциалов с учетом неоднородности их процессов на смежных участках поверхностей. О значениях этой величины можно судить по справочной литературе [3].

**Обобщенная эквивалентная электрическая схема трибосистемы.** На формирование электрических схем трибосистем существенную роль оказывают материалы фрикционной пары, а именно: химические элементы, входящие в состав материалов, их валентность, а также преобладающий тип собственной проводимости (табл. 1, 2), а также знак заряда электричества элементов пары трения, определяющий закономерности трибоэлектричества.

В случае одновременного действия гальваноЭДС  $\xi_g$  и термоЭДС  $\xi_t$ , когда появление термоэлемента означает переход гальваноэлемента в режим короткого замыкания, отвечает эквивалентная схема трехфазной трибосистемы в виде рис. 10.

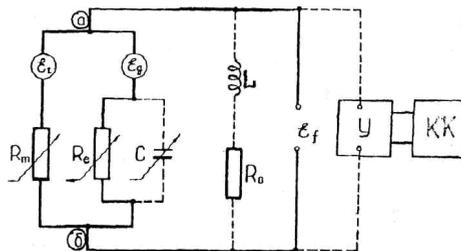


Рис. 10. Обобщенная принципиальная электрическая схема трехфазной системы

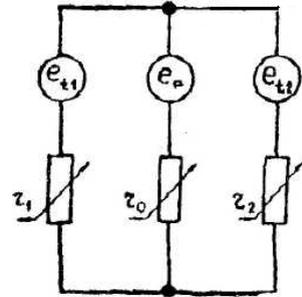


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема контактной ячейки при относительном скольжении металлической поверхности в присутствии электролита

Таблиця 1

## Характеристики сплавів

Хімічні елементи, що містяться в сплаві	Валентність	Преобладаючий тип власної провідності
C	2, 4	діелектрик
Al	3	<i>n</i>
St	4	полупровідник
Ti	2, 3, 4	<i>n</i>
V	5	<i>n</i>
Cr	3, 6	<i>p</i>
Mn	2, 3, 4, 6, 7	<i>n</i>
Fe	2, 3	<i>n</i>
Nt	2	<i>n</i>
Cu	1, 2	<i>n</i>
Mo	6	<i>p</i>
W	6	<i>p</i>

Таблиця 2

## Некоторые закономерности трибоэлектричества

Фрикционная пара	Знак заряда	
	+	-
Два химически одинаковых тела	плотность тела:	
	большая	меньшая
Диэлектрик – мелкие частицы (пыль) из этого же диэлектрика	диэлектрик	мелкие частицы
Диэлектрик-диэлектрик	Диэлектрик с диэлектрической проницаемостью:	
	большой	меньшей
	Диэлектрик с твердостью:	
	большой	меньшей
Металл-металл	металл с твердостью:	
	меньшей	большой
Металл-диэлектрик	диэлектрик	металл

Здесь  $R_m$  и  $R_e$  – сопротивление: пятна контактов, электролита; емкость  $C$  отражает способность пятен контактов микровыступов в связи с увеличением их площадей поверхностей для накопления электрических зарядов, когда в полости фрикционного конденсатора присутствует третья фаза. Электродвижущая сила  $\xi_f$  (разность потенциалов  $\varphi_a - \varphi_b$  при  $R_0 \rightarrow \infty$ ) является своего рода интегральным параметром, характеризующим те условия, в которых протекает процесс электротермомеханического трения. Ее регистрация с помощью безинерционной аппаратуры ( $У$  – усилитель, КК – компьютерный комплекс) позволяет, в частности, получить информацию о состоянии тонких пленок на контактных площадках микровыступов.

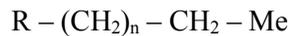
Кроме упомянутых источников ЭДС, особая роль при трении принадлежит своеобразному униполярному генератору (контур индуктивности  $L$  с сопротивлением  $R_0$ ), который превращается в трибосопряжение, если один из ее элементов окажется в намагниченном состоянии (металлический фрикционный элемент). Причиной естественного намагничивания тел могут быть: магнитные поля окружающих ферромагнетиков, появившиеся из-за насыщенности деталей и узлов электрооборудованием; поля, связанные с замкнутыми термоэлектрическими контурами; упругомагнитный эффект, гиромангнитный эффект (при очень быстром вращении); магнитное поле Земли и т. д.

Отличительным признаком ЭДС электромагнитной индукции  $\xi_f$  в данном случае по сравнению с  $\xi_v$ ,  $\xi_a$  и  $\xi_g$  является, во-первых, то, что сам факт ее существования не зависит от наличия непосредственного контакта тел или присутствия жидкой фазы, и, во-вторых, то, что наводится она в массе одного из трущихся тел, движущегося по отношению к намагниченному контртелу – источнику неоднородного поля. Поэтому в схеме на рис. 10 источник  $\xi_f$  нельзя под-

ключать параллельно источникам  $\xi_t$  и  $\xi_g$ , тогда как с источником  $\xi_a$ , например, так поступать можно.

В случае если в обобщенной принципиальной электрической схеме трехфазной трибосистемы  $R_e=0$  и  $R_0=0$  она будет однофазной, отвечающей работе полимерной накладки в диапазоне поверхностных температур ниже допустимой для ее фрикционных материалов.

**Влияние электризации на явление массопереноса в металлополимерных трибосопряжениях.** Параллельное изучение механохимических и трибоэлектрических явлений при скольжении металлического фрикционного элемента по полимерной накладке позволит обосновать природу образования полимерных пленок на поверхности металла, и наоборот, переноса металла на поверхность полимерной накладки. Механохимические эффекты сводятся к разрыву углерод-углеродных и других химических связей в тех местах полимерных цепей, где энергия связи достаточно велика, крекингу цепочечных макромолекул с появлением аномально высокой концентрации свободных радикалов и вступлению этих радикалов в различные химические реакции, в том числе в прямые реакции с окисленной и ювенальной поверхностью металла на участках ее обнажения при электротермомеханическом трении и износе, по схеме:



или через образование промежуточного перекисного радикала  $R-CH_3 - O - O -$  в результате присоединения кислорода. При этом большое значение имеют термофлуктуационные акты начального распада перенапряженных молекул полимера, вызывающих появление в его прослойках первых свободных радикалов. Такие акты играют роль как бы «спускового механизма» и приводят к быстрому распаду множества других полимерных молекул, что «высвобождает большое количество сосредоточенной в них упругой механической энергии». Выделение последней (в виде теплоты) способствует полимеризации осколков макромолекул, которая может пойти по пути образования вторичных структур, заметно отличающихся по своим физическим свойствам.

Установившемуся режиму трения в системе «металл-полимер» соответствует, по-видимому, некоторое динамическое равновесие скоростей распада и образования полимеров (сополимеров), на которое степень электризации и ее знак оказывают самое непосредственное влияние. Действительно, скольжение металла по накладке сопровождается существенным нарушением электронной плотности в каждой точке фрикционного контакта микровыступов. Переход зарядов через границу раздела может происходить как в том, так и в другом направлении; в зависимости от этого полимер заряжается либо положительно, либо отрицательно по отношению к сопряженному с ней металлическому телу. Поэтому и принято условно делить полимеры на электроположительные и электроотрицательные, подкачка, например, электронов к поверхности раздела со стороны органического соединения вполне возможна благодаря перемещению электронов вдоль цепи макромолекул по линии ковалентных связей и переходам между соседними длинноцепочечными молекулами. Что касается подпитки свободными электронами приповерхностного слоя металла, то она зависит от электроемкости металлического фрикционного элемента и может происходить бесконечно долго, если последний соединен с таким практически «бездонным» резервуаром электрических зарядов, как, скажем, Земля. Приобретение поверхностью ди-

електрика потенціала в декілька тисяч вольт свідчить про існування між обкладками фрикційного конденсатора «робоча поверхня металічного фрикційного елемента – робоча поверхня полімерної накладки», а також між їх мікрорівнями дуже сильного електричного поля активізуючого ерозійні та дифузійні процеси і, що головне, викликає виведення і, перенесення електронів металу на електроотрицательний полімер і, навпаки, електропозитивних продуктів термо-механодеструкції полімера на металічну поверхню з утворенням на ній захисної плівки. Прочність цієї плівки залежить від реакційної здатності атомів вуглецю з ненасиченими валентними зв'язками і в якійсь мірі, якщо врахувати оборотне відновлення гомогенних ланцюгів і з'явлення нових гетерогенних молекул, – від адгезійної активності функціональних груп полімерних матеріалів. При цьому поверхня полімерної накладки ніколи не повертається в своє первісне структурне стан.

Кінетика механохімічних та трибоелектричних явищ відображається на поведінці динамічного коефіцієнта тертя, визначає порядок сил, протидіюючих ковзанню і прикладаним до металополімерної трибо-системи. Деяким викладеним вище представленням послужила невелика серія відкриттів, головними моментами яких є наступне:

– при термічному опорі контакту металополімерних пар тертя і накопиченні теплоти в зоні температур вище допустимої для матеріалів поверхневих і приповерхневих шарів в зоні тертя виникає багатство мікротермоелектричних з різною енергетичною активністю, сприяючих інверсії теплових потоків від полімера до металу і виникненню стійкої теплової стабілізації при мінімальному температурному градієнті по товщині металічного фрикційного елемента [4];

– виникає при терті електротермічне опорі дискретних контактів з різною енергетичною активністю мікро-конденсаторів і термоелектричних з миттєвим їх переключенням при зміні площі пят контакту мікрорівнів і градієнта механічних властивостей, а також темп виникнення взаємодіюючих між собою імпульсів електричного і теплового струмів визначають інтенсивність зносу мікрорівнів при переполяризації, що веде до дестабілізації динамічного коефіцієнта тертя металополімерних пар тертя [5];

– при різних енергетичних рівнях поверхневих і приповерхневих шарів металополімерних пар тертя стадії процесу електротермомеханічного тертя зароджуються, розвиваються і здійснюються в певній послідовності ефекти з особливими перехідними процесами, принципами суперпозиції і виникненням побічних ефектів, при цьому змінюються лінії струмів динамічного, електричного, магнітного, теплового і хімічного полів в взаємодії з лініями струмів швидкісного поля омиваючих серед підкоряються хвильової природі з зсувом по фазі [6];

– утворившись під дією виникаючого при терті електротермічного вибуху продукти, потрапляючи в щілини між мікрорівнями пар тертя, сприяють генеруванню об'ємного електричного заряду і виникненню електротерморозряду, що веде до пробію шару залишених продуктів і їх масопереносу на робочу поверхню металічного фрикційного елемента пари тертя [7].

**Выводы.** Таким образом, раскрыта природа действия линий теплового тока и возникающих изотерм; основных источников трибоэлектроЭДС; влияния электризации на явление массопереноса в трибосопряжениях, а также предложена обобщенная эквивалентная электрическая схема трехфазной трибосистемы с возможностью ее перехода в двух и однофазную схемы.

#### Список литературы

1. Закономерности изменения характеристик процессов, явлений и эффектов в рабочих слоях металлополимерных пар при электротермомеханическом трении / А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, Д.А. Вольченко [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2014. – №6(1). – С. 7–24.
2. Контактно-импульсное взаимодействие материалов типа «металл-металл» и «полимер-полимер» в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / АХ. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2013. – №5 (2). – С. 29–42.
3. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) /А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. Под. общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 576 с.
4. Диплом №444 на открытие «Явление тепловой стабилизации в металлополимерных парах трения» от 18.01.2013 г. авторов А.И. Вольченко, М.В. Киндрачука, Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко. – М.: Международ. акад. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А-588 от 05.09.2012 г.
5. Диплом №462 на открытие «Закономерность изменения износо-фрикционных характеристик поверхностных слоев металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии от 28.12.2013 г. авторов А.И. Вольченко, А.Д. Пашаева, А.Х. Джанахмедова и др. – Международ. акад. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А-588 от 07.09.2013 г.
6. Диплом №476 на открытие «Закономерность реализации процесса электротермомеханического трения в рабочих слоях металлополимерных пар трения» от 17.10.2014 г. авторов А.И. Вольченко, А.Х. Джанахмедова, Д.А. Вольченко и др. – М.: Международ. акад. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А-609 от 26.04.2014 г.
7. Диплом №482 на открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» от 27.02.2015 г. авторов А.И. Вольченко, А.Х. Джанахмедова, Д.А. Вольченко и др. – М.: Международ. акад. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А-618 от 18.12.2014 г.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2015

*М. В. КИДРАЧУК, Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, С. І. КРИШТОПА, В. С. СКРИПНИК, П. С. КРАСІН*

#### **ГЕНЕРУВАННЯ ТЕРМОЕРС НА ПЛЯМАХ КОНТАКТУ МІКРОВИСТУПІВ, ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯВИЩЕ МАСОПЕРЕНОСУ В ТРИБОСПРЯЖЕННІ**

Розкрита природа джерел ЕРС в трибосопряженнях, проілюстровані лінії теплових струмів з різними матеріалами пар тертя, запропонована узагальнена еквівалентна електрична схема трибосистеми, а також розкрито вплив електризації на явище переносу в металлолімерних трибосопряженнях.

**Ключові слова:** термоелектроЕРС, пари тертя: «метал-метал», «полімер-полімер», електричні та теплові струми, еквівалентна електрична схема трибосистеми, масоперенос в трибосистемах.

---

*M. V. KINDRACHUK, D.A. VOLCHENKO, S.I. KRISHTOPA, V.S. SKRIPNIK, P.S. KRASIN*

**GENERATION OF THE THERMO EMF ON THE SPOT OF THE MICROPROTRUSSIONS CONTACT AND ITS IMPACT ON THE PHENOMENON OF MASS TRANSFER IN TRIBOCOUPLING**

The materials of the article disclosed the nature of the sources of EMF in the friction units, illustrated the lines of thermal currents with different materials of friction pairs. A generalized equivalent circuit diagram of tribological system is offered. The effect of electrification to the phenomenon of migration metal friction units is disclosed. We've discussed the following questions: lines of thermal currents and the isotherms occurring in the interaction of the contacts of the friction pairs from different materials; the main sources of EMF in the friction units; generalized equivalent circuit diagram of tribological system; the effect of electrification on the phenomenon of mass transfer in metal friction units.

**Keywords:** thermo EMF, friction pair «metal-metal», «polymer-polymer», electrical and thermal currents, the equivalent circuit diagram of the tribological system, mass transfer in the tribological system.

**Киндрачук Мирослав Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73, E-mail: Kindrachuk@ukr.net.

**Вольченко Дмитрий Александрович** – д-р. техн. наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел. +38 0342 72 74 41, E-mail: vol21@ukr.net.

**Криштопа Святослав Игоревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры нефтегазового технологического транспорта, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел. +38 0342 72 71 48, E-mail: rettes@mail.ru.

**Скрипник Василий Степанович** – канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел. +38 0342 72 71 58, E-mail: bzhd@nung.edu.ua

**Красин Пётр Сергеевич** – аспирант кафедры материаловедения и автосервиса, Кубанский государственный технологический университет, ул. Красная, 135, ауд. К-51, г. Краснодар, Россия, 350004, тел.: +78 612 55 99 26.