

УДК 621.891

¹А. И. Вольченко, д-р техн. наук, проф.,

²Н. А. Вольченко, канд. техн. наук, доц.,

¹Д. А. Вольченко, канд. техн. наук, доц.,

³Н. М. Стебелецкая, ассистент,

²П. А. Поляков, аспирант

¹Ю. М. Бурда, студент

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИКЕ ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ (часть 3)

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

²Кубанский государственный технологический университет (Россия)

³Бережанский агротехнический институт

Раскрыты основы определения направлений составляющих генерируемых токов в парах трения фрикционных узлов тормозных устройств. Проиллюстрировано влияние составляющих генерируемых токов на общее тепловое состояние пар трения тормозных устройств.

Введение. За последние 15-ть лет наблюдается бурное развитие наноматериалов на основе углеродных соединений. К таким материалам относятся тубулены (углеродные нанотрубки), фуллерены и графены. Перечисленные материалы находят применение в медицине, цифровой электронике, средствах телекоммуникации, информационных технологиях и других отраслях. Вероятно, что в ближайшее время наноматериалы найдут применение как составляющие у фрикционных материалах для накладок тормозных устройств.

Состояние проблемы. Одной из основных задач тепловой динамики трения является определение направлений составляющих электрических токов, генерируемых в парах трения тормозных устройств. В работах [1; 2] показана возможность применения зонда Кельвина в трибологии, особенно на наноуровне при рассмотрении поверхностных слоев пар трения тормозных устройств.

Электрические явления при трении полимеров были раскрыты в работе [3]. При этом было уделено внимание составляющим электрическим токам, генерируемых в парах трения. В работе [4] проиллюстрировано: взаимодействие поверхностей трения тормозных устройств; формирование микротермобатарей и их работа в парах трения; генерируе-

мые токи на поверхности трения. Однако в перечисленных выше работах [1; 2; 3; 4] отсутствует определение направлений составляющих генерируемых токов в парах трения тормозных устройств на наноровне.

Теоретические аспекты решаемой проблемы. Определение направлений составляющих электрических токов должно вестись в зонах теплового состояния поверхности фрикционной накладки до и выше допустимой температуры для ее материалов. Модели пар трения «полимер – металл» показаны в зонах теплового состояния фрикционной накладки 2 до (рис. 1, а) и выше (рис. 1, в) допустимой температуры материалов накладки. Выгорание связующих компонентов фрикционных материалов накладок является причиной дымления их поверхностей, и приводит к образованию на них жидких фракций 3 (рис. 1, в). На рис. 1, б, г проиллюстрированы закономерности изменения плотности зарядов (σ) в зоне динамического контактирования по ее длине (l). Во втором случае происходит выравнивание плотности зарядов из-за увеличения зоны взаимного динамического контактирования.

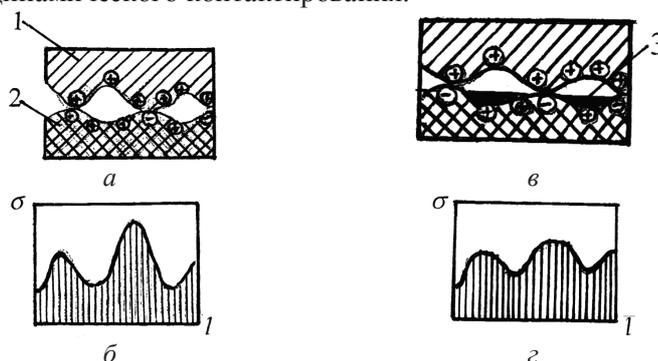


Рис. 1. Модели фрикционного контакта «металл (1) – полимер 2» и создаваемые между ними плотности электрических зарядов (σ) на их контактирующих макроучастках (б, г) в диапазоне поверхностных температур до (а, б) и выше (в, г) допустимой температуры для материалов полимера

Металлополимерную фрикционную пару барабанно-колодочного тормоза рассматриваем как источник трибо- и термо-ЭДС (E_{ϕ} и E_T) с соответствующими внутренними сопротивлениями (рис. 2). Внутренним сопротивлением источника трибоЭДС является сопротивление фактического контакта, включающее сопротив-

ление макроучастков контакта: «полимер – ювенильная поверхность металла» (R_1); «полимер – окисная пленка металла» (R_2); «полимер – металл с перенесенной пленкой полимера» (R_3); «полимер – металл с перенесенной пленкой металла-металл» (R_4); «приповерхностный слой полимера, находящийся в различном термодинамическом состоянии – металл» (R_5), а источника термоЭДС – сопротивление фактического контакта, последовательно соединенное с сопротивлением объема полимера (R_{II}). Емкость (C), параллельно подключенная с сопротивлением фактического контакта (R_{II}) отражает вклад не перекрываемых поверхностей взаимодействующих макроучастков. В соответствии с приведенной схемой (см. рис. 2) трибоЭДС (E_ϕ) представляет собой сумму контактной составляющей, обусловленной наличием контактной разности потенциалов ($\Delta\phi_1$): внешней – за счет того, что рабочая поверхность металлического фрикционного элемента отдает электроны рабочей поверхности полимерной фрикционной накладке и она накапливает их на своей поверхности, что ведет к возникновению в нагретом слое электрического поля с очень короткими линиями, который называется двойным электрическим слоем (рис. 3 а).

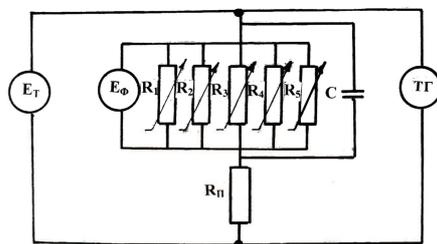


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема фрикционного контакта «металл-полимер»

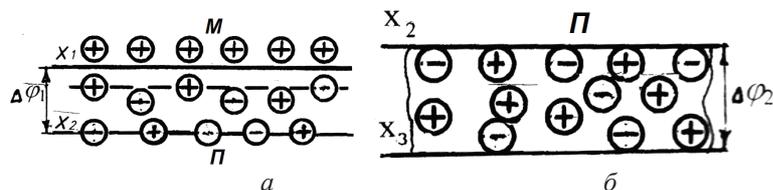


Рис. 3. Схемы построения внешнего (а) и внутреннего (б) двойного электрического слоя в паре трения и в приповерхностном слое фрикционной накладки: М – металл, П – полимер

При возникновении двойного электрического слоя по всей проводящей поверхности взаимодействия электрические заряды $+q$ и $-q$ смещаются друг относительно друга за счет замедленного вращения металлического фрикционного элемента при торможении барабанно-колодочным тормозом. При этом макроучастки поверхностей трения фрикционных накладок, имеющие остаточные сжимающие напряжения становятся анодами (+) неизношенные, а напряженные (изношенные) – катодами (-) (рис. 4).

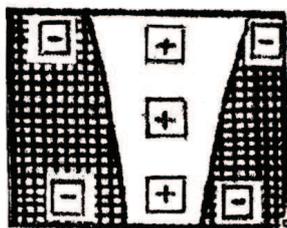


Рис. 4 Вид сверху на фрикционную накладку тормозной колодки:
+ – неизношенные и – – изношенные поверхности накладки

Внутренняя контактная разность потенциалов ($\Delta\varphi_2$) между рабочей поверхностью фрикционной накладки (уровень x_2) и нижней отметкой ее приповерхностного слоя (уровень x_3) обусловлена возникновением двойного электрического слоя по всей проводящей его глубине взаимодействия электрических зарядов $+q$ и $-q$, смещающихся друг относительно друга благодаря наличию плоскости смещения x_3 (см. рис. 3, б).

Таким образом, образование внешнего и внутреннего двойных электрических слоев, вызывающих контактную разность потенциалов, происходит на межфазной границе двух сред с различными характеристиками проводимости: электронной (металлический фрикционный элемент) и ионной (поверхностный и приповерхностные слои накладки, находящиеся в различных термодинамических состояниях). Поверхностный и приповерхностный слой фрикционных накладок являются многокомпонентными, т.е. гетерогенной системой, в которой рассмотрение их моделей (см. рис. 1, а, в) ведется как для твердого и пластично-жидкого вещества, соответственно, ниже и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки [5].

Особенно существенное влияние поверхностных состояний пар трения барабанно-колодочного тормоза на структуру двойного

электрического слоя, возникающего при контакте «металл – полимер». В этом случае при большой плотности поверхностных состояний реализуется эффект металлизации поверхности полимера, при котором заряд двойного слоя образуется за счет ионизации поверхностных состояний и по порядку величины сравним с зарядами слоев, возникающих при контакте металлов.

При этом необходимо учитывать тот факт, что система «металл – полимер» в контакте находится в неуравновешенном термодинамическом состоянии. В то же время взаимодействие частиц внутри микроскопического объема, которыми являются термоэлементы микротермобатарей гораздо сильнее, чем с элементами других частей системы, в результате чего каждый такой объем считается находящимся в равновесии, а между отдельными объектами, т.е. во всей системе, равновесие отсутствует.

В соответствии с работой микротермобатарей в режимах микротермоэлектрогенератора (ТГ) и микротермоэлектрохолодильников [4; 6] и представленной электрической схемой (см. рис. 2) трибоЭДС (E_{ϕ}) является суммой контактно-скользящей составляющей, обусловленной наличием контактной разности потенциалов пары «полимер-металл» и «поверхности полимера-нижний уровень приповерхностного слоя полимера» и составляющей, обусловленной массопереносом в зоне трения макроучастков и сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях контактирующих материалов. Тогда генерируемый в цепи за счет трибоЭДС ток I_{ϕ} будет алгебраической суммой токов

$$I_a = I_{CR} + I_V + I_L + I_N + I_H \quad (1)$$

где I_{CK} , I_M , I_D , I_T , I_P – токи, возникающие за счет: электризации скольжения и контакта; движения заряженных частиц фрикционного массопереноса; сорбционно-десорбционных процессов в приповерхностных слоях контакта; термический; обратного заряда, возникающего при разрушении фрикционного контакта (импульсный ток).

Барабанно-колодочный тормоз (рис. 5) содержит тормозной барабан 1, имеющего обод 2 с внутренней (рабочей) 3 и наружной 4 поверхностями. Внутренняя поверхность 3 обода 2 с помощью цилиндрических канавок 5 по его периметру разделена на одинаковые диски 6. На наружной поверхности 4 обода 2 со стороны его свободного края выполнен прилив в виде подкрепляющего кольца 7. С противоположной стороны обод 2 барабана 1 сопряжен с

фланцем 8, в котором выполнены отверстия 9. С помощью последних тормозной барабан 1 прикреплен к фланцу ступицы 10 посредством болтов 11. В свою очередь, фланец ступицы 10 снизу через роликовый подшипник 12 опирается на полуось 13 заднего моста.

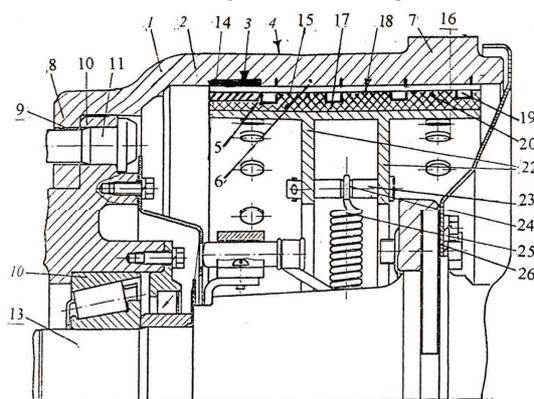


Рис. 5. Продольный разрез заднего барабанно-колодочного тормоза автотранспортного средства

Внутри тормозного барабана 1 установлены тормозные колодки 14, к основанию 15 которых с помощью заклепок 16 прикреплены фрикционные накладки 17, выполненные из полимерного материала и из материала, с которого изготовлен обод 2 барабана 1. Металлический фрикционный элемент расположен со стороны обода 2 барабана 1, сопряженного с фланцем 8. На рабочей поверхности 18 фрикционной накладки 17 по всему ее периметру выполнены канавки 19, разделяющие их рабочие поверхности 18 на отдельные сектора 20. Наличие в ободе 2 барабана 1 четырех независимых дисков 6, один из которых изготовлен из фрикционного материала, и секторов 20 фрикционных накладок 17 колодок 14 тормоза позволяет моделировать на их макроучастках следующие виды контактов: «полимер-ювенильная поверхность металла»; «полимер-металл с перенесенной пленкой полимера»; «полимер с перенесенной пленкой металла-металл»; «приповерхностный слой полимера, находящийся в различном термодинамическом состоянии – металл». Кроме того, моделировать на их микроучастках следующие типы пар трения: прямую – «металлическая поверхность-полимерная поверхность» и обратную – «полимерная поверхность-металлическая поверхность». Под каждым пазом 19 по

ширине в одной из накладок 17 выполнено сквозное окно 21 в ее теле в основании 15 колодки 14.

С нерабочей стороны основания 15 колодки 14 размещены их ребра жесткости 22, которые между собой соединены пальцем 23 с проточкой 24. В последнюю посажена оттяжная цилиндрическая пружина 25. Со свободного края обода 2 тормозного барабана 1 уставлен направляющий диск 26, к которому крепятся тормозные колодки 14.

В окна 21 одной из тормозных колодок 14 установлены эталонные металлический и полимерный образцы 27 (рис. 6, а, б) в виде пластин, изготовленных из того же материала, что и обод 2 барабана 1 и фрикционная накладка 17. Образцы 27 связаны напрямую с модуляторами 28, а также через измерительные устройства 29 с регистрирующим устройством 30.

В дальнейшем, после завершения торможения барабанно-колодочным тормозом на стенде, начиная со стороны защемления обода 2 с фланцем 8, поочередно в окна 21 набегающей поверхности тормозной колодки 14 по ширине основания 15 производят перестановки эталонного металлического и полимерного образцов 27.

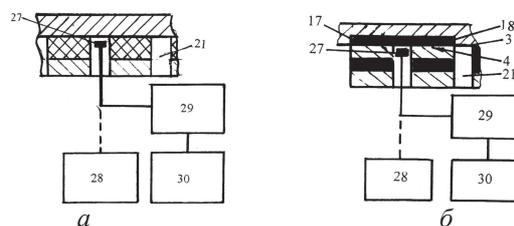


Рис. 6. Измерительные схемы оценки контактной разности потенциалов между рабочими поверхностями: а – обода барабана и относительно стабильной поверхностью металлического эталонного образца; б – накладки обода барабана и относительно стабильной поверхностью полимерного фрикционного эталонного образца

Рядом с эталонным металлическим и полимерным образцами 27 монтируют, соответственно, две и одну пластинчатые термопары согласно работы [4].

Барабанно-колодочный тормоз на стенде работает следующим образом. Разгоняют маховые массы стенда до заданной скорости и выполняют торможение тормозом. В процессе торможения барабанно-колодочным тормозом разжимной кулак (на чертеже не показан) разводит тормозные колодки 14, фрикционные и металли-

ческие накладки 17, которые своими рабочими поверхностями 18 взаимодействуют с рабочими металлическими и фрикционной поверхностями 3 обода 2 тормозного барабана 1. В результате длительных или циклических торможений достигается нагревание пар трения тормоза до заданного состояния и при этом возникают тепловые потоки, направленные в тело обода 2 барабана 1 и в приповерхностный слой накладки 17, собственно в тело накладки 17 и в основание 15 тормозной колодки 14. Для моделирования торможения автотранспортного средства в дорожных условиях пары трения барабанно-колодочного тормоза принудительно обдувают окружающим воздухом.

Для оценки теплового потока, генерируемого в парах трения, представим закон Фурье в форме, аналогичной закону Ома в электротехнике, оперируя понятием о термическом сопротивлении неоднородной многослойной стенки ($\sum_{i=1}^n R_i$) с температурами поверхностей деталей фрикционного узла барабанно-колодочного тормоза. Получили следующую зависимость для величины теплового потока

$$q = \frac{t_{\delta 1} - t_k}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (2)$$

где $t_{\delta 1}$ – температура наружной поверхности обода тормозного барабана; t_k – температура внутренней поверхности основания тормозной колодки; $\sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$; $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ – термическое сопротивление: основания колодки с температурами t_k и t_{k1} ; фрикционной накладки с температурами t_n и t_1 ; приповерхностного слоя накладки с температурами t_{n1} и t_c ; обода тормозного барабана с температурами t_{δ} и $t_{\delta 1}$.

Зависимость для определения термического сопротивления пар трения барабанно-колодочного тормоза имеет вид

$$\sum_{i=1}^n R_i = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – толщины и коэффициенты теплопроводности материалов: основания тормозной колодки; фрикционной накладки и ее приповерхностного слоя; обода тормозного барабана.

Определение направлений действующих токов в парах трения тормозных устройств. Метод определения направлений

составляющих электрических токов в парах трения «полимер – металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях реализуют в пять этапов (заявка на патент на изобретение России №2010115528 с приоритетом от 19.04.2010 г).

Первый этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, до и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки и одновременным включением в цепь модулятора эталонного металлического образца определяют составляющую суммарного тока, возникающего за счет трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей.

При включении модулятора 28 в цепь, создающего вибрацию эталонного металлического образца 27, и измерительного устройства 29, являющегося фазовой автокомпенсационной системой постоянно отслеживающей на выходе потенциал, равный на регистрирующем устройстве 30 контактной разности потенциалов между исследуемыми объектами, а с помощью термоэлектродов пластинчатой и ступенчатой пластинчатой термодпар регистрируют разность потенциалов между внешним и внутренним уровнями приповерхностного слоя 38 сектора 20 накладки 17 по его длине.

Составляющую суммарного тока, возникающего за счет трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков определяют по зависимости вида,

$$\sum_1^n I_{СК} = \frac{\Delta\phi_{1i} - \Delta\phi_{2i}}{\sum_1^n R_i}$$

где $\Delta\phi_{1i}$ – разность потенциалов между поверхностью диска б обода 2 барабана 1 и эталонным металлическим образцом 27, подключенного к модулятору 28; $\Delta\phi_{2i}$ – разность потенциалов между термоэлектродами пластинчатой и ступенчатой пластинчатой термодпарами.

Модифицируем известную формулу Круппа для определения величины плотности контактно-скользящего заряда и определяем величину $I_{СК}$ применительно к случаю наличия пяти видов макроучастков контакта

$$I_{СК} = \frac{d}{dt}(\sigma A_R) = \frac{d}{dt} e D_A \left[\begin{array}{l} (W_M - W_{II}) A_{R_1} + (W_0 - W_{II}) A_{R_2} + (W_{IIM} - W_{II}) A_{R_3} + \\ + (W_M - W_{MII}) A_{R_4} + (W_M - W_0) A_{R_5} \end{array} \right] \text{ где } t -$$

время торможения; σ – плотность заряда; A_R – соответствующие площади макроучастков скользящего контакта и отвечающие им термические сопротивления; e – заряд электрона; D_A – плотность поверх-

ностного состояния фрикционной накладки; $W_M, W_{II}, W_0, W_{IIМ}, W_{МП}, W_0$ – работа выхода электрона из: металла; полимера, окисной пленки металла; перенесенной пленки полимера на металл; перенесенной пленки металла на полимер; приповерхностного слоя полимера при сорбционно-десорбционных процессах.

Анализ приведенного выражения показывает, что поскольку в большинстве случаев значения $W_0 > W_{II}, A_{R2} > A_{R1}$ (при $t=0$), $W_{II} \approx W_{IIМ}, \frac{dA_{e1}}{dt} > 0, \frac{dA_{R3}}{dt} \geq 0; W_M \approx W_{МП}, \frac{dA_{R1}}{dt} > 0, \frac{dA_{R4}}{dt} > 0.$

В случае термоактивированного эффекта растворение поверхностного слоя металла полимером и восстановления металла из окисла $\frac{dA_{R2}}{dt} < 0$ (для кислородосодержащих полимеров возможно $\frac{dA_{R2}}{dt} > 0$), то величина тока $I_{СК}$ будут определяться в начальный период трения вторым слагаемым, а в дальнейшем при достижении трибосистемой состояния, удовлетворяющего равенству $(W_M - W_{II})A_{R1} + (W_M - W_{МП})A_{R4} = (W_0 - W_{II})A_{R2} + (W_{IIМ} - W_{II})A_{R3}$ – первым слагаемым.

Определение составляющей I_K (тока контактного взаимодействия), являющейся компонентой $I_{СК}$ производится в лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения ниже и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки барабанно-колодочного тормоза и при замкнутых парах трения при остановленном тормозе, и одновременном включением в цепь модулятора 28 эталонного металлического образца 27 определяют составляющую суммарного тока, возникающего за счет трения скольжения взаимодействующих макроучастком поверхностей. Составляющую суммарного тока, возникающего за счет трения скольжения взаимодействующих макроучастков поверхностей определяют как разность

$$\sum_1^n I_{СК} - \sum_1^n I_K = \sum_1^n I_C,$$

где $I_{СК}, I_K$ – составляющие суммарных токов, вызванных скольжением и контактным взаимодействием и собственно контактным взаимодействием. Поэтому для режима нагревания макроучастков взаимодействующих пар трения через каждые 50 °С и остановки тор-

моза при включенном эталонном металлическом образце 27 к модулятору 28 определяют разность потенциалов для неработающего тормоза с раздвинутыми колодками 14 и находят составляющую суммарного тока, возникающего за счет контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей по зависимости вида $\sum_{i=1}^n I_k = \frac{\Delta\varphi_{1i1} - \Delta\varphi_{2i2}}{\sum_{i=1}^n R_i}$, составляющую суммарных токов, вызванных сколь-

жением и контактным взаимодействием макроучастков определяют согласно данным этапа.

Направление тока I_{ck} в парах трения барабанно-колодочного тормоза в процессе торможения автотранспортного средства определяется преимущественным направлением вращения тормозного барабана (см. рис. 7 а). Ток I_{ck} состоит из двух составляющих, т. е. скольжения (I_c) и контактного взаимодействия (I_k). Первая направлена по касательной к поверхностям трения, а вторая – перпендикулярно. Результирующий ток I_{ck} является гипотенузой прямоугольника, построенного на его катетах. При этом полярность суммарного тока скользящей контактной электризации I_{ck} не является квазистабильной в динамике процесса трения вследствие непостоянства параметров скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков пары трения.

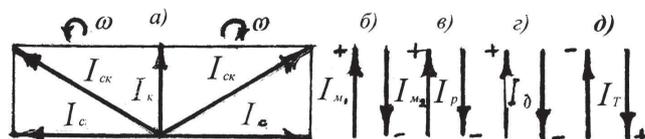


Рис. 7. Схемы направлений составляющих электрических токов при температурах до (а) и выше (б) допустимой для материалов фрикционной накладки

Второй этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, до и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки и одновременным включением в цепь модуляторов эталонных металлического и полимерного образцов и определяют составляющую суммарного тока, образованного движением заряженных частиц фрикционного массопереноса.

По соотношению максимальных к минимальным суммарным токам, возникающих за счет трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей трения, моделирующий прямую и обратную пары трения определяют долю составляющего суммарного тока, образованного движением заряженных частиц фрикционного массопереноса

– для полимерной составляющей

$$\sum_1^n I_{M1}, \% = \frac{\sum_1^n I_{Kcmax1}}{\sum_1^n I_{Kcmin1}}, \quad (4)$$

– для металлической составляющей

$$\sum_1^n I_{M2}, \% = \frac{\sum_1^n I_{Kcmax2}}{\sum_1^n I_{Kcmin2}}. \quad (5)$$

Кроме того, величина тока массопереноса I_M в общем случае определяется алгебраической суммой токов

$$I_M = \sum_i q_i n_i v_i, \quad (6)$$

где q_i , n_i , v_i – заряд, количество и средняя скорость i -ой частицы массопереноса.

В связи с тем, что вибрирующий под действием модулятора 28 металлический эталонный образец 27 расположен на расстоянии 0,5 мм под вращающейся дорожкой трения металлического диска 6 обода 2 барабана 1, то образуется с ней цилиндрический конденсатор емкостью C . Однако из-за незначительной площади поверхности металлического эталонного образца 27, и представив дорожку трения металлического диска 6 в виде бесконечной пластины, указанный конденсатор представляем как плоский и имеющий заряд

$$q = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{e},$$

вследствие разности работы выхода электрона (e) металлического эталонного образца 27 и вращающегося диска 6 обода 2 барабана 1. Аналогичные рассуждения справедливы и для полимерной пары, т.е. полимерного эталонного образца 29 и фрикционного диска 6, расположенного на ободке 2 барабана 1.

Полагая, что перенос осуществляется двумя видами заряженных частиц, выражение для тока массопереноса записывается в виде

$$I_M = I_{M_1} + I_{M_2} = |q_1 n_1 v_1| + |q_2 n_2 v_2|. \quad (7)$$

Из анализа зависимости (7) очевидна коррекция между количеством частиц n и интенсивностью изнашивания. Экспериментальным путем установлено, что износ полимера в 8–10 раз происходит быстрее, чем металлического фрикционного элемента. В случае, если $W_{II} > W_M$, то сила тока I_{M_1} увеличивает составляющую I_K , в результате чего суммарный ток I_{CK} растет. В то же время I_{M_2} уменьшает составляющую I_K , в результате чего суммарный ток I_{CK} будет незначительно уменьшаться. В случае, если $W_M > W_{II}$ наблюдается противоположная картина. На рис. 7, б показаны направления токов I_{M_1} и I_{M_2} .

Третий этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, до и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки и одновременным включением в цепь модулятора эталонного металлического образца с фиксацией времени торможения определяют составляющую суммарного тока, называемую разрядным током (импульсным током).

Разрядный ток вызван пробоем внешнего электрического поля и поэтому он приводит к движению электрических зарядов между микроучастками взаимодействующих поверхностей пар трения тормоза. Для точного определения количества зарядов эталонный металлический образец 27 устанавливается заподлицо сектора 20 фрикционной накладки 17 напротив независимого диска 6 обода 2 тормозного барабана 1. При включении модулятора 28 в цепь, создающего вибрацию эталонного металлического образца 27 следят за реакцией зарядов, так называемым баллистическим отклонением: стрелка регистрирующего устройства 29 отклоняется, затем идет в обратную сторону и возвращается к исходному положению. Для измерения импульса зарядов достаточно одного отсчета положения стрелки на регистрирующем устройстве 29. При этом фиксируется продолжительность времени (τ) данного процесса. После

чего по зависимости вида $I_P = \frac{q}{\tau}$ (где q – количество зарядов необходимого для пробоя внешнего электрического поля).

При $W_M > W_{II}$ направление тока является отрицательным, а при $W_{II} > W_M$ – положительным. На рис. 7 проиллюстрированы направления токов I_P .

Четвертый этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, т. е. ниже и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки определяют суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в межконтактной зоне макроучастков поверхностей взаимодействия и деструкционными изменениями в приповерхностных слоях секторов фрикционных накладок тормозных колодок.

Работа приповерхностных слоев сектора 20 накладки 17 в зоне и выше допустимой температуры для их материалов характеризуется процессами дымления, образованием жидких фракций и их превращением в парообразное состояние. Поэтому в приповерхностных слоях сектора 20 накладки 17 устанавливается как минимум две пластинчатые термодпары с термоэлектродами, расположенными на трех уровнях. Последнее обстоятельство по разностям потенциалов, зарегистрированных пластинчатыми термодпарами в приповерхностном слое сектора 20 накладки 17 и находят по зависи-

мости вида $\sum_1^n I_{\partial} = \frac{\Delta\varphi_{1cd} - \Delta\varphi_{2cd}}{R_3}$ (где $\Delta\varphi_{1cd}$, $\Delta\varphi_{2cd}$ – разность потен-

циалов внешней и внутренней поверхности приповерхностного слоя секторов 20 накладки 17; R_3 – термическое сопротивление приповерхностного слоя секторов 20 накладки 17) определить суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностном слое сектора 20 накладок 17 тормозных колодок 14.

Ток I_{∂} , обусловлен сорбционно-десорбционными процессами, как в межконтактной зоне, так и в приповерхностном слое фрикционной накладки определяется суммой зарядов медленных состояний, взаимодействующих поверхностей. Знак поверхностного за-

ряда зависти от состава газового окружения, т. е. от адсорбционных процессов. Установлено, что при малых количествах поглощенного водорода поверхность адсорбента заряжается положительно, а при достаточном поглощении – отрицательно. Аналогичная картина наблюдается при адсорбции или десорбции воды. Поскольку группа ОН обладает электронодонорными свойствами, то адсорбция воды приведет к увеличению исходного положительного заряда или к уменьшению исходного отрицательного заряда, а в пределе – к инверсии знака заряда. Следовательно, при определенных условиях в процессе фрикционного взаимодействия направления токов I_d и составляющей токов $I_{ск}$ слагаемого I_k при условиях $W_{II} > W_M$ и $W_M > W_{II}$ будут либо совпадать, либо противоположны. На рис. 7, з показаны направления тока I_d .

Пятый этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, до и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки определяют суммарный термический ток.

Для эффективной реализации способа рабочие поверхности 3 обода 2 и фрикционных накладок 17 разделены продольными канавками 5 и 19 различной ширины и поэтому одни края их совмещены в вертикальной плоскости, образуя таким образом независимые пары трения «металлические диски 6 – сектора накладок 20». Рабочие поверхности последних нагреваются на тормозном стенде путем выполнения барабанно-колодочным тормозом циклических или длительных торможений. С помощью термоэлектродов 36 пластинчатой термопары, расположенной заподлицо приповерхностного слоя 38 сектора 20 фрикционной накладки 17 по ее длине, регистрируют разность термоэлектродвижущих сил (термоЭДС), отвечающим поверхностным температурам на тарировочных графиках, зарегистрированных термоэлектродами пластинчатой термопарой, а затем определяют ЭДС термотока по зависимости вида $E_T = K_{II}(t_1 - t_2)$, где K_{II} – коэффициент термоЭДС, мкВ/°С; t_1 и t_2 – поверхностная температура пар трения и окружающей среды, °С; после чего по зависимости вида

$$\sum_1^n I_T = \frac{ET}{\sum_1^n R_i}; \quad \sum_1^n R_i = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – толщины и коэффициенты теплопроводности материалов: основания тормозной колодки; фрикционной накладки и ее приповерхностного слоя; обода тормозного барабана) находят величины суммарных термических токов.

В горячем контакте термоток всегда идет из фрикционного элемента с меньшим значением K во фрикционный элемент с большим значением K . Следовательно, при $K_{II} > 0$ термоток I_T будет направлен от полимера к металлу (отрицательное направление). На рис. 7, δ проиллюстрированы направления тока I_T .

Таким образом, экспериментально регистрируемый суммарный ток электризации с учетом направлений слагаемых токов имеет вид

$$\text{при } W_{II} > W_M \quad I_{\Phi-} = +I_{CK} + I_M + I_p \pm I_o - I_T; \quad (8)$$

$$\text{при } W_M > W_{II} \quad I_{\Phi+} = I_{CK} - I_M - I_p \pm I_o + I_T. \quad (9)$$

Однако на величины составляющих суммарного тока электризации в парах трения барабанно-колодочного тормоза существенно влияет тепловое состояние к указанной зоне при условии,

что $W_{II} > W_M$. При этом суммарные токи $\sum_1^n I_{CK}$ и $\sum_1^n I_M$ будут большими, чем при условии $W_M > W_{II}$.

Это обстоятельство указывает на то, что при торможениях происходит интенсивное накопление тепловой энергии в металлическом элементе трения, а конвективный теплообмен с его матовых поверхностей и радиационный теплообмен весьма незначительны. Наиболее интересное явление происходит в зоне стабилизационного теплового состояния металлического фрикционного элемента в случае интенсификации сорбционно-десорбционных процессов, происходящих в приповерхностных слоях материала накладок при

условии $W_M > W_{II}$. В этом случае суммарные токи $\sum_1^n I_{CK}$ и

$\sum_1^n I_p$ будут большими, чем при условии $W_{II} > W_M$. Выгорание свя-

зующих компонентов фрикционных материалов вызывает дымления их поверхностей, и приводит к образованию на них жидких фракций, что является причиной инверсии теплового потока от ма-

товых 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 фрикционной накладки, 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; $dW > 0$ в том случае, если дополнительная энергия термохимической реакции деструкции связующих компонентов материала поверхностных слоев накладки и радиационного теплообмена между взаимодействующими поверхностями трения тормоза будет расти интенсивнее, чем энергия нагружения трибосистемы, определяемая величиной работы сил трения; dT – изменение поверхностной температуры пар трения тормоза).

Выводы. Таким образом, определены направления составляющих электрических токов в парах трения «полимер-металл» барабанно-колодочного тормоза при преимущественном направлении вращения его барабана при их нагревании в стендовых условиях до и выше допустимой температуры материалов фрикционной накладки для точной оценки генерируемого количества теплоты в процессе длительных или циклических торможений.

Список литературы

1. Применение зонда Кельвина в трибологии/ Шипица Н.А., Жарин А.Л., Сорока Д.И. – Материалы международн. «Механика и трибология транспортных систем». – Ростов на Дону, т. 2, 2003. – С. 398-402.
2. Трибология/ Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В. – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2009. – 392 с.

3. *Миронов В.С.* Электрические явления при трении полимеров. II. Кинетика электризации/Миронов В.С., Климович А.Ф.// Трение и износ, том VI. – 1985. №6. – С. 1026-1033.

4. *Вольченко А.И., Киндрачук М.В., Вольченко Н.А., Вольченко Д.А., Бекиш И.О., Поляков П.А.* Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов (часть 2)// Проблемы тертя та зношування. Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк». – 2011. – Вип.55. – С.27–46.

5. *Вольченко Д.А.* Нанотрибология при оценке двойного электрического слоя в парах трения тормозных устройств/ Вольченко Д.А.// Проблемы трибології. – 2009.–№ (3). – С.108–114.

6. *Вольченко Д.А.* Методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую в парах трения тормозных устройств/ Вольченко Д.А. // Проблемы трибології. – 2010. - № 2. – С.85–93.

Вольченко А.И., Вольченко Н.А., Вольченко Д.А., Стебелецкая Н.М., Поляков П.О., Бурда Ю.М., Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 3)// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С. 47–64.

Розкрито основи визначення напрямів складових генеруються струмів в парах тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв. Проілюстровано вплив складових генеруються струмів на загальне теплове стан пар тертя гальмівних пристроїв.

Рис. 7, список літ.: 6 найм.

A new approach to the thermal dynamics of friction frictional braking device nodes (part 3)

Disclosed basis for determining areas of the components generated by currents in the friction pairs of friction units brakes. The effect of the components generated by currents on the overall thermal state of the friction couples of braking devices is shown.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2011