

¹А. И. Вольченко, д-р техн. наук, проф.,
²М. В. Киндрачук, д-р техн. наук, проф.,
¹Д. А. Вольченко, канд. техн. наук, доц.,
¹И. О. Бекиш, канд. техн. наук, доц.,
³Н. М. Стебелецкая, ассистент,
⁴П. А. Поляков, асп.

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИКЕ ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ (часть 2)

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
²Национальный авиационный университет
³Бережанский агротехнический институт
⁴Кубанский государственный технологический университет, (Россия)

Раскрыты основы образования микробатарей в парах трения тормозных устройств, работающих в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников, а также определены составляющие генерируемых составляющих токов.

Введение. Современная тепловая динамика трения фрикционных узлов тормозных устройств не в состоянии дать ответ на вопрос о том, каким образом: происходит преобразование тепловой энергии в электрическую и наоборот; определяются составляющие токов и их направление в парах трения скольжения; осуществляется инверсия токов в парах трения; происходит изменение теплового состояния пар трения и на много других вопросов. Интенсивное развитие нанотрибологии поверхностных и приповерхностных слоев металлических и полимерных фрикционных элементов в интервале рабочих температур для их материалов позволяют дать ответ на перечисленные выше вопросы.

И. В. Крагельский [1; 2] отметил, что образование холодной плазмы в поверхностях трения и поведения плазмы в зазоре между парами трения до сих пор не исследованы. Он подчеркнул, что процессы, обуславливающие работоспособность пары трения протекают в очень тонком поверхностном слое. Глубина активно деформируемой зоны составляет микроны и десятые доли микрона (мкм). Решающее значение имеет величина сопротивления на сдвиг пленки, толщина которой не превышает десятые и сотые доли микро-

на. Изучение ее природы и структуры является задачей первостепенной важности, так как пленки металлического и полимерного фрикционных элементов способствуют формированию двойных электрических слоев [3] и являются составляющими микротермобатарей.

Работа [4] посвящена раскрытию природы вторичных процессов массопереноса в трибосистемах, так как они непосредственно определяют нагрузочные характеристики, уровень потерь на трение, интенсивность изнашивания сопряжений при условии наличия сформированной эффективной структуры трибосистем как на микро, – так и на макроуровне. Предложен универсальный структурный элемент трибосистемы в виде стержневой трубчатой системы (в продольном сечении), имеющий вид восьмерки с острыми вершинами как на двух горизонтальных плоскостях, проведенных посередине окружностей так и в одной вертикальной плоскости по оси ее симметрии.

В зависимости от твердости (H) и размеров поверхностей касания (A_n) взаимодействующих пар трения профессор Д.Н. Гаркунов предложил различать следующие условия расположения фрикционных материалов:

$$H_1 > H_2 ; A_{H_1} < A_{H_2} ; (1) \quad H_1 > H_2 ; A_{H_1} > A_{H_2} ; (2)$$

Первый случай отвечает скольжению рабочей поверхности металлического фрикционного элемента, наименьшей номинальной поверхности касания по поверхности накладки, которая имеет меньшую твердость, но зато большую поверхность касания. Второй случай отвечает скольжению металлического фрикционного элемента с намазанным на его поверхности фрикционным материалом по поверхности накладок, обеспечивая тем самым максимальные поверхности касания. При этом первый фрикционный элемент имеет приведенную твердость большую, чем материал накладки, и в то же время большую поверхность касания. Как в первом, так и во втором случае взаимодействия пар трения соблюдается принцип прямой пары трения.

Таким образом, из-за массопереноса происходит на микроуровнях формирование прямых пар трения, вызывающих в кинетике прямые и обратные токи электризации.

Авторы работы [5] утверждают, что обнаружено явление множественных инверсий тока электризации при фрикционном взаимодействии полимеров с металлами. Как единичные, так и множественные инверсии тока зарегистрированы при контактировании полярных

и неполярных полимеров с металлами, а также при динамическом контактировании с металлами дисперсных полимеров.

Комплексное исследование влияния условий фрикционного контактирования с металлом на кинетику электризации дисперсных и блочных полимеров позволило установить [5], что первая инверсия тока электризации вызвана десорбцией влаги из поверхностных слоев полимера, а последующие, очевидно, физико-химическими процессами, вызваны изменениями энергетического состояния металло-полимерной системы.

Взаимодействие поверхностей трения тормозных устройств. В процессе работы пар трения тормозных устройств подъемно-транспортного оборудования, автотранспортных средств, дорожных и строительных машин возможно одновременное контактное взаимодействие следующих поверхностей:

- фрикционной накладки – ювенильной и неювенильной поверхностей металлического фрикционного элемента;
- фрикционной накладки – оксидных и неоксидных пленок поверхностей металлического фрикционного элемента;
- фрикционной накладки – перенесенной пленки фрикционного материала на обод металлического фрикционного элемента и окисных и неокисных пленок на нем;
- фрикционной накладки с перенесенной пленкой металла – оксидных и неоксидных пленок поверхности обода металлического фрикционного элемента.

Согласно работ [2; 6; 7; 8] во фрикционном контакте должны всегда присутствовать пленка оксида (рабочая поверхность обода металлического фрикционного элемента) и пленка мягкой составляющей трения (рабочая поверхность фрикционной накладки).

На обнаженной ювенильной поверхности обода металлического фрикционного элемента атомы кристаллической решетки легко вступают в соединения с окружающей средой. Это приводит к образованию на поверхности металла чрезвычайно тонких, невидимых простым глазом пленок оксидов и различных веществ, содержащихся в межконтактном зазоре между парами трения тормоза. Эти пленки очень прочно связаны с металлом и могут быть удалены лишь при специальной тщательной очистке, нагреванием в вакууме до высоких температур, воздействием адсорбирующих

веществ. Наиболее действенным способом является разрушение оксидных пленок при трении.

Рабочая поверхность фрикционной накладки содержит окисленные и неокисленные пленки, которые являются мягкими. При этом прочность связи элементов поверхностного слоя накладки является меньше прочности связи частиц в основном ее материале.

Различают быстрые и медленные поверхностные состояния пар трения тормозных устройств в связи с тем, что они отличаются временами захвата носителей заряда. Время жизни быстрых состояний составляет 10^{-4} – 10^{-7} с; они часто возникают на чистой, не окислившейся поверхности и отличаются слабой специфичностью к конкретному виду дефектов.

Медленные поверхностные состояния обычно связывают с наличием оксидных пленок на рабочей поверхности обода металлического фрикционного элемента и фрикционных накладок, которые чаще всего обусловлены процессами адсорбции-десорбции. По данным работ [4], время жизни медленных состояний колеблется от 10^{-2} с до нескольких часов и суток. Плотность медленных состояний составляет 10^{10} – 10^{15} см². Последняя зависит от внешних факторов и электрических свойств пар трения тормозных устройств. По данным Круппа [5], плотность поверхностных состояний для полимеров составляет $D_s=10^{10}$ см².

Таким образом, вследствие наличия поверхностных состояний и заполнения их носителями заряда на поверхности фрикционной накладки возникает электрический заряд. Причем полный поверхностный заряд в общем случае является суммой зарядов быстрых (σ_1) и медленных (σ_2) поверхностных состояний

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 .$$

Тогда для быстропротекающих процессов, т. е. процессов электризации при трении, когда время контакта составляет 10^{-5} с, полный поверхностный заряд фрикционной накладки будет соответствовать сумме зарядов в быстрых и медленных поверхностных состояниях, а для релаксационных процессов, связанных с электретным эффектом в системе полимер-металл, сопутствующие трению, в частности массоперенос, наводораживание и т. д.

Особенно существенно влияние поверхностных состояний пар трения барабанно-колодочного тормоза на структуру двойного слоя, возникающего при контакте «металл-полимер». В этом слу-

чае 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 неравновешенном термодинамическом состоянии. В то же время взаимодействие частиц внутри макроскопического малого объема, которыми являются термоэлементы микротермобатарей гораздо сильнее, чем с элементами других частей системы, в результате чего каждый такой объем можно считать находящимся в равновесии, а между отдельными объектами, т. е. во всей системе, равновесие отсутствует [9].

Формирование микротермобатарей и их работа в парах трения тормозных устройств. Сначала рассмотрим полупроводниковые пленки фрикционных элементов при эффекте электризации в передаче пропускного и запирающего тока (рис. 1, а, б). При одном направлении тока дырки в полупроводниковой пленке и электроны в другой движутся навстречу друг другу и создают пропускной ток, при противоположном направлении тока они расходятся, увеличивая сопротивление непроводящего запирающего слоя [10].

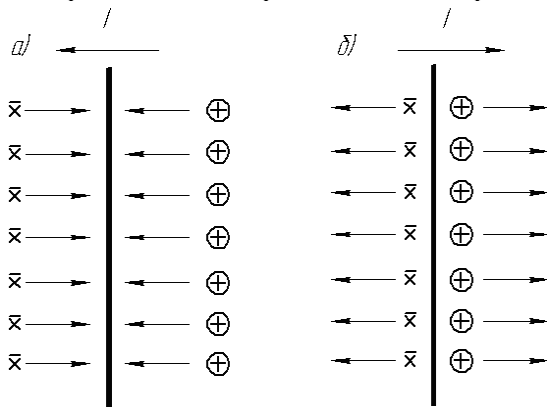


Рис. 1. Пропускной (а) и запирающий (б) токи в электронных (\otimes) и дырочных (\oplus) полупроводниковых пленках фрикционных элементов

Рассмотрим принцип работы микротермобатарей, состоящих из двух электропроводных материалов, которые имеют разные

проводимости (рис. 2, *a*), обусловленные работой пар трения тормозных устройств в диапазоне температур ниже и выше допустимой для материала фрикционной накладки, т. е. при различных температурах поверхности и при этом приповерхностный слой не претерпевает деструктивных изменений.

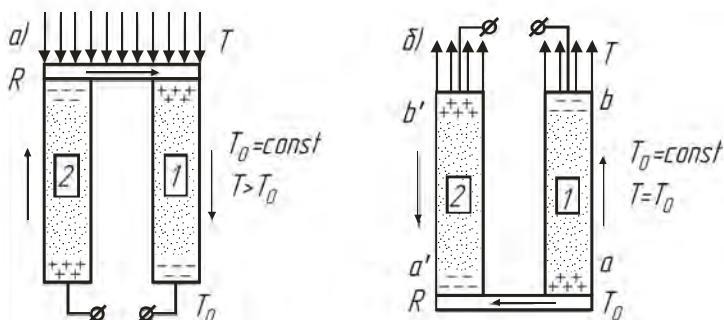


Рис. 2. Микротермобатареи с термоэлементами (1 и 2), работающие в режимах микротермогенератора (*a*) и микротермохолодильника (*б*)

Концы термоэлементов 1 и 2 соединенные металлическим мостиком с сопротивлением R , являющегося окислительной пленкой с полупроводниковыми свойствами, находящейся в элементарном объеме приповерхностного слоя обода металлического фрикционного элемента и выполняющего функции горячего спая микротермобатареи. Электронная проводимость термоэлемента 1 образована массопереносом фрикционного материала накладки на рабочую поверхность обода металлического фрикционного элемента. В элементарном объеме приповерхностного слоя фрикционной накладки находится мягкая окислительная пленка с полупроводниковыми свойствами, которая и соединяет вторые концы термоэлементов электрической цепи. При трении температура соединительного мостика увеличивается в сравнении с температурой T_0 холодильных концов термоэлементов ($T > T_0$), тепловая энергия атомов горячего конца термоэлементов растет. Эта энергия выполняет работу перехода электронов в свободное состояние. В связи с этим в термоэлементе 1 на горячем конце появляется большее количество свободных электронов и с высшей тепловой энергией, чем на холодном конце, заряжая его отрицательно. В связи с тепловым движением атомов в термоэлементе 2 некоторая часть электронов вы-

носятся из рабочей зоны. На их месте появляются свободные электроны (ионы), которые имеют положительный заряд. Направление перемещения положительных зарядов совпадает с направлением электрического поля, потому их движение ускоряется. В то же время электроны, которые двигаются против электрического поля, замедляются и переходят в зону меньших скоростей. При этом за счет адсорбции кислорода часть поверхности оксидной пленки в элементарном объеме приповерхностного слоя накладки заряжается отрицательно, являясь холодным концом термоэлемента 1 . При замыкании цепи в ней наблюдается электрический ток, предопределенный разницей температур. Фактически имеет место эффект Зеебека, а сама микротермобатарея является микротермоэлектрогенератором.

Рассмотрим работу микротермобатареи при условии, что температура поверхности фрикционной накладки превысила допустимую для её материалов. Как видно из рис. 2, б полярность термоэлементов 1 и 2 при условии $T=T_0$ стала противоположной рис. 2, а. При этом приповерхностный слой фрикционной накладки претерпевает деструкционные изменения, а поверхности трения тормоза подвергаются адсорбционно-десорбционному воздействию [11].

Если по внутренней цепи, все элементы которой находятся при одинаковых условиях ($T=T_0$), протекает электрический ток в направлении, указанном на рис. 2, б, то свободные электроны которые находятся в термоэлементе 1 , приобретают направленное движение от спая (а) к спаю (в), причем их движение является замедленным, поскольку электроны тормозятся электрическим током. Движение электронов от спая (а) к спаю (в) сопровождается переносом энергии. На спае (а) электроны, отбирая энергию атомов, приобретают прирост кинетической энергии. На конце (в), сталкиваясь с атомами кристаллической решетки окисленной пленки поверхности обода тормозного барабана, они отдают энергию указанному спаю. В связи с этим спай (а) охлаждается, а спай (в) нагревается. Причем скопление электронов на спае (в) способствует тому, что этот спай заряжается отрицательно, а спай (а) – положительно.

В термоэлементе 2 , который соединен с термоэлементом 1 с помощью мостика с сопротивлением R , состоящего их электролита, направление электрического тока совпадает с направлением движения ионов: от спая (а') к спаю (в'). В результате чего движение ионов ускоряется. Поэтому наиболее интенсивное движение электро-

нов наблюдается около спая (в'). Образование электронов в элементарном объеме приповерхностного слоя барабана связано с ионизацией газовой смеси возле него, а также десорбцией влаги в нем. В самом же элементарном объеме приповерхностного слоя обода движение свободных электронов происходит против движения электрического тока, т. е. против его поля. При этом электроны, сталкиваясь с атомами, повышают их внутреннюю энергию, которая тратится на нагревание этого спая. По мере передвижения от спая (в') к спаю (а') вдоль ветви термоэлемента I энергия электронов уменьшается, в результате чего спай (а') охлаждается. Скопление ионов на этом спае предопределяет его отрицательный заряд, а в общем, спай (а') заряжен положительно.

Таким образом, движение тока инверсии через микротермобатарей приводит к перепаду температур на ее спаях. На спае (а') поглощается теплота, а на спае (в') – выделяется в результате контактного взаимодействия пар трения тормоза. В этом случае микротермобатарея работает в режиме микротермоэлектрохолодильника.

Генерируемые токи на поверхности трения тормозных устройств. Определение генерируемых токов на поверхности трения проиллюстрируем на примере барабанно-колодочного тормоза автотранспортного средства (заявка на патент на изобретение России № 2010107170/20 с приоритетом от 26.02.2010 г.).

На рис. 3 показан продольный разрез заднего барабанно-колодочного тормоза автотранспортного средства; на рис. 4 представлена измерительная схема оценки контактной разности потенциалов между рабочей поверхностью обода тормозного барабана и относительно стабильной поверхностью металлического эталонного образца; на рис. 5 проиллюстрирован общий вид пластинчатой термопары, размещенной в предохранительном корпусе; на рис. 6 изображена схема установки различных типов термопар в тормозную колодку; на рис. 7 проиллюстрирована тепловая модель фрикционного узла барабанно-колодочного тормоза; на рис. 8 приведены закономерности изменения толщины приповерхностного слоя накладки (материал ФК-24А) при его исследования в лабораторных условиях в зависимости от температуры поверхностей пары трения (прямая 1 соответствует зоне приработки; кривые 2 и 3 – износу до 0,5 и 0,75 рабочей толщины накладки).

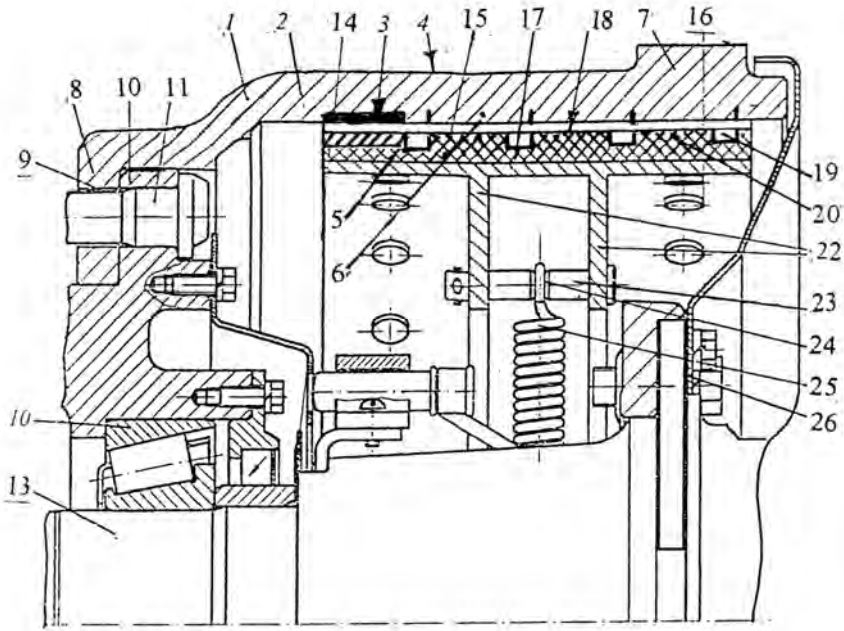


Рис. 3. Продольный разрез заднего барабанно-колодочного тормоза авто-транспортного средства

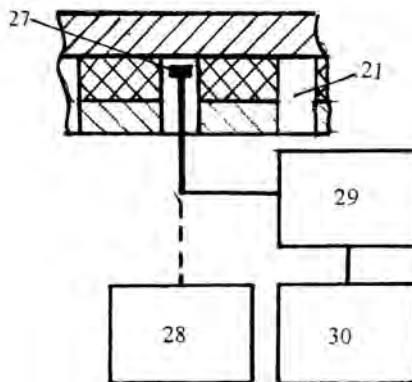


Рис. 4. Измерительная схема оценки контактной разности потенциалов между рабочей поверхностью обода тормозного барабана и относительно стабильной поверхностью металлического эталонного образца

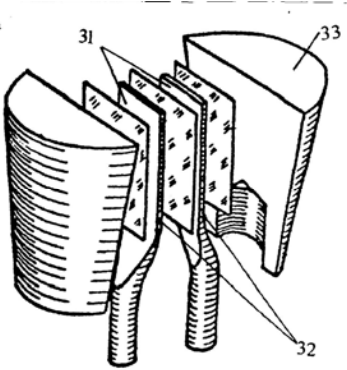


Рис. 5. Общий вид пластинчатой термопары

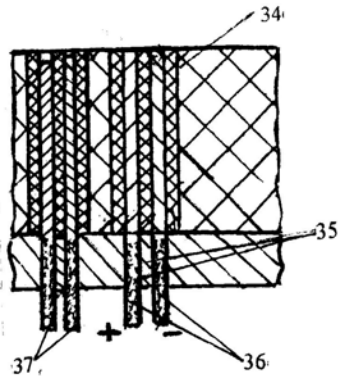


Рис. 6. Схема установки различных типов термопар в тормозную колодку

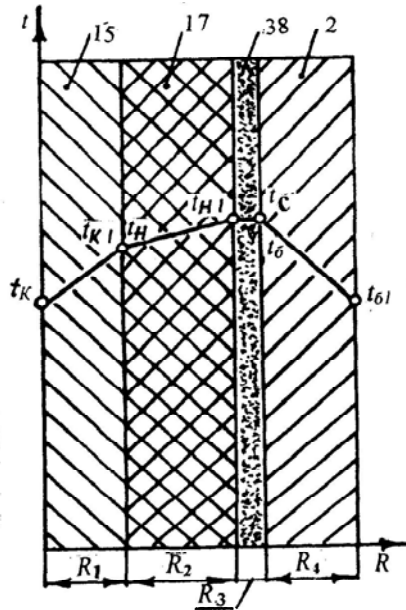


Рис. 7. Тепловая модель frictionного узла барабанно-колодочного тормоза

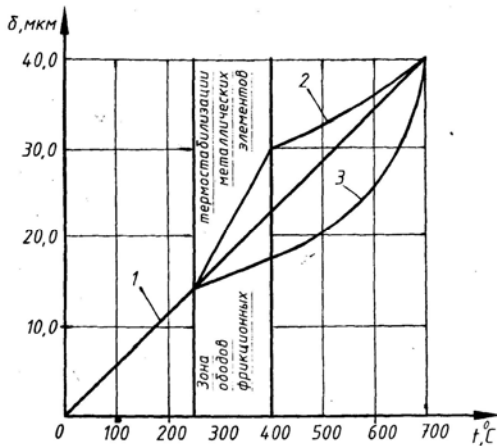


Рис. 8. Закономерности изменения толщины приповерхностного слоя накладке (материал ФК-24А) при его исследованиях в лабораторных условиях в зависимости от температуры поверхностей пары трения

Барабанно-колодочный тормоз 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.

Внутри тормозного барабана 1 установлены тормозные колодки 14, к основанию 15 которых с помощью заклепок 16 прикреплены фрикционные накладки 17, имеющие рабочую поверхность 18. На последней по всему периметру накладок 17 выполнены канавки 19, разделяющие их рабочие поверхности 18 на отдельные сектора 20. Наличие в ободе 2 барабана 1 четырех независимых дисков 6 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». 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 окно 21 одной из тормозных колодок 14 установлен эталонный металлический образец 27 и виде пластины, изготовленной из того же материала, что и обод 2 тормозного барабана 1. Эталонный металлический образец 27 связан напрямую с модулятором 28, а также через измерительное устройство 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 тормозной колодки 14 по ширине основания 15 производят перестановки эталонного металлического образца 27.

Рядом с эталонным металлическим образцом 27 монтируются две пластинчатые термопары, каждая из которых имеет термоэлектроды 31, изготовленные из хромеля (+) и копеля (-), между которыми расположен слой изоляции 32. Каждая из термопар размещена в корпусе 33. Устанавливаются пластинчатые термопары в отверстия 34 во фрикционной накладке 17, имеющей приповерхностный слой 38 в средней части колодки 14, а в ее основании 15 выполнены отверстия 35, через которые пропущены выводы 36 и 37 термопар. Термоэлектроды 36 первой термопары расположены заподлицо сектора 20 накладке 17, т. е. на ее рабочей поверхности 18. Термоэлектроды 37 второй термопары выполнены различной высоты и расположены в приповерхностном слое 38 сектора 20 накладке 17 и поэтому она названа ступенчатой пластинчатой термопарой.

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 накладки 17, которые своими рабочими поверхностями 18 взаимодействуют с рабочими 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 38 накладки 17, собственно в тело накладки 17 и в основание 15 тормозной колодки 14.

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

$$q = \frac{t_{\delta 1} - t_k}{\sum_1^n R_i},$$

где $t_{\delta 1}$ – температура наружной поверхности обода тормозного барабана; t_k – температура внутренней поверхности основания тормозной колодки; $\sum_1^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$; $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ – 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

$$\sum_1^n R_i = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4},$$

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.

Метод определения составляющих электрических токов в парах трения «полимер – металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях реализуют в пять этапов.

Первый этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, т. е. ниже, в зоне 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 термоэлектродвижущихся сил (термоЭДС), отвечающим поверхностным температурам на тарифовочных графиках, зарегистрированных термоэлектродами 36 пластинчатой термопарой, а затем определяют ЭДС термотока по зависимости вида $E_i = K(t_1 - t_2)$, где K – коэффициент термоЭДС, мкВ/°С; t_1 и t_2 – поверхностная температура пар трения и окружающей среды, °С; после чего по зависимости вида

$$\sum_1^n IT = \frac{E_i}{\sum_1^n Ri} \sum_1^n Ri = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4};$$

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.

Второй этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения барабанно-колодочного тормоза в зависимости от степени их нагретости, т. е. ниже, в зоне и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки и одновременным включением в цепь мо-

дулятора 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 [12], а с помощью термоэлектродов 36 и 37 пластинчатой и ступенчатой пластинчатой термопар 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,
$$\sum_1^n I_{ск} = \frac{\Delta\varphi_{1i} - \Delta\varphi_{2i}}{\sum_1^n R_i}$$

где $\Delta\varphi_{1i}$ – разность потенциалов между поверхностью диска 6 обода 2 барабана и эталонным металлическим образцом 27, подключенного к модулятору 28; $\Delta\varphi_{2i}$ – разность потенциалов между термоэлектродами 36 и 37 пластинчатой и ступенчатой пластинчатой термопарами.

Суммарный обратный ток разряда ($\sum_1^n I_p$), возникающий при разрушении фрикционного контакта (суммарный импульсный ток) входит в качестве составляющей, возникающей от трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастка поверхностей пар трения и характеризуется всплеском тока на графических зависимостях.

Третий этап. В лабораторных условиях на тормозном стенде путем нагревания макроучастков пар трения ниже, в зоне и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладке барабанно-колодочного тормоза и при замкнутых парах трения при остановленном тормозе, и одновременным 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 макроучастком поверхностей определяют как разность

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

где I_{CK} , 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 тормоза при одинаковых удельных нагрузках и включенном металлическом образце 27 к модулятору 28 определяют разность потенциалов для неработающего тормоза с раздвинутыми тормозными колодками и находят составляющую суммарного тока, возникающего за счет контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей по зависимости вида $\sum_1^n I_K = \frac{\Delta\varphi_{1i1} - \Delta\varphi_{2i2}}{\sum_1^n Ri}$. Составляющую сум-

марных токов, вызванных скольжением и контактным взаимодействием макроучастков определяют согласно данным второго этапа.

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, в зоне и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки и одновременным включением в цель модулятора эталонного металлического образца 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 определяют долю составляющего суммарного тока, образованного движением заряженных частиц фрикционного массопереноса $\sum_1^n I_M, \% = \frac{\sum_1^n I_{K\max}}{\sum_1^n I_{K\min}}$.

Кроме того, суммарный ток, образованный движением заряженных частиц фрикционного массопереноса определяют по зависимости вида

$$\sum_1^n I_{M,} = \sum_1^n q_i n_i v_i$$

где q , n , v – заряд, количество и средняя скорость движения частиц 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

$$q = \frac{\Phi_{1i} - \Phi_{2i}}{e}, \text{ вследствие разности работы выхода электрона (} e \text{)}$$

металлического эталонного образца 27 и вращающегося диска 6 обода 2 барабана 1.

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

Работа приповерхностных слоев 38 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 38 сектора 20 накладки 17 устанавливается как минимум две пластинчатые термопары с термоэлектродами 36 и 37 расположенными на трех уровнях. В результате чего по разностям потенциалов, зарегистрированных пластинчатыми термопарами в приповерхностном слое 38 сектора 20 накладки 17 и находят по

зависимости вида $\sum_1^n I g = \frac{\Delta\varphi_{1cd} - \Delta\varphi_{2cd}}{R_3}$ (где $\Delta\varphi_{1cd}$, $\Delta\varphi_{2cd}$ – разность

потенциалов внешней и внутренней поверхности приповерхностного слоя 38 секторов 20 накладки 17; R_3 – термическое сопротивление приповерхностного слоя 38 секторов 20 накладки 17) суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностном слое 38 сектора 20 накладок 17 тормозных колодок 14.

Наибольшую трудность представляет определение толщины приповерхностного слоя 38 секторов 20 накладки 17. Согласно см. рис. 8 линейная зависимость I указывает на то, что в приповерхностном слое сектора накладки происходят электризационные процессы случайного контактного взаимодействия на макроучастках, которые с течением времени приработке переходят в составляющую постоянного контактного взаимодействия, и тогда совершается движение заряженных частиц фрикционного массопереноса. Суммарные токи обратного разряда и токи, обусловленные сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях контакта в области приработки, являются незначительными. При этом сохраняется пористая структура приповерхностных слоев секторов накладок. При изнашивании секторов накладок на 50% от их начальной толщины (см. рис. 8, кривая 2) токи контактного взаимодействия значительно увеличиваются, особенно ток обратного разряда, что объясняется разрушением фрикционного контакта и термостабилизационным состоянием обода тормозного барабана. Все это способствует интенсификации сорбционно-десорбционных процессов в приповерхностных слоях секторов накладок. При их изнашивании на 75% (рис. 8, кривая 3) поры приповерхностных слоев являются закрытыми продуктами разрушения материалов секторов и при этом токи контактного взаимодействия и ток обратного разряда существенно уменьшаются, активность сорбционно-десорбционных процессов резко падает. Установлено, что термостабилизационное состояние обода тормозного барабана почти не влияет на электрический баланс приповерхностных слоев секторов накладок.

Выводы. Таким образом, проиллюстрировано формирование микробатарей в парах трения тормозных устройств, работающих в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохро-

лодильников, а также метод определения составляющих электрических токов в парах трения «полимер – металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях на основе расчетно-экспериментальных данных для точной оценки генерируемого количества теплоты в процессе торможения.

Список литературы

1. *Крагельский И.В.* Современные представления о трении и износе материалов/ Крагельский И.В. – В кн.: Исследование структуры фрикционных материалов при трении.–М.:Наука, 1972.–С. 8–16.
2. *Крагельский И.В.* Фрикционное взаимодействие тел/ И.В. Крагельский– Трение и износ, т. 1, 1980, №1. – С. 12–29.
3. Вольченко Д.А. Нанотрибология при оценке двойного электрического слоя в парах трения тормозных устройств/ Д.А.Вольченко // Проблемы трибології. – 2009.-№ (3). – С.108–114.
4. *Бородай И.В.* О вторичных эффектах трения и основах обеспечения эффективности трибосистем / И.В.Бородай, А.В.Клименко, В.И.Пономарев / – Материалы междунаrodn. конгресс. ”Механика и трибология транспортных систем – 2003”. – Ростов на Дону, том 1. – 2003. – с. 131–135.
5. *Мионов В. С.* Электрические явления при трении полимеров. II. Кинетика электризации/ В.С.Мионов, А.Ф.Климович // Трение и износ, том VI. – 1985. №6. – С. 1026–1033.
6. Пленочные термоэлементы: физика и применение/ [Б.М.Гольцман, З.М.Дашевский, Б.И.Кайданов, Н.В.Коломоец]. – М.:Наука, 1985. – 213с.
7. *Прокопів В.В.* Матеріали електронної техніки/ В.В. Прокопів–Івано-Франківськ: Плай. – 2009. – 228с.
8. Наноматеріали в пристроях генерування і накопичення електричної енергії/ [Б.К. Остафійчук, І.М. Бузуляк, І.І. Григорчак, / І.Ф. Миرونюк]. – Івано-Франківськ:Плай, 2003. – 203с.
9. *Чичинадзе А.В.* Износостойкость фрикционных полимерных материалов/ А.В.Чичинадзе, В.Я.Белоусов, И.М.Богатчук // – Львов. – Вища школа, 1989. – 114с.
10. *Буджак Я.С.* Лабораторно-розрахунковий практикум з фізики напівпровідників та теорії твердого тіла/ Я.С.Буджак, П.І.Мельник, С.П.Новосядлий // Івано-Франківськ: Плай. – 2007. – 253 с.
11. Трибологія/ М.В.Кіндрачук, В.Ф.Лабунець, М.І.Пашечко, Є.В. Корбут // – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». – 2009. – 392 с.
12. *Вольченко Д.А.* Методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую в парах трения тормозных устройств/ Д.А. Вольченко // Проблемы трибології. – 2010. –№ 2. – С.85–93.

Вольченко А.І., Кіндрачук М.В., Вольченко Д.А., Бекіш І.О., Стебілецька Н.М. Поляков П.А. Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 2) // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55. – С. 27–46.

Розкрито основи освіти мікробатарей в парах тертя гальмівних пристроїв, що працюють в режимах мікротермоелектрогенераторів і мікротермоелектрохолодильників, а також визначено складові струмів, що генеруються.

Рис. 8, список літ.: 12 найм.

A new approach to the thermal dynamics of friction frictional braking device nodes (part 2)

Disclosed basis of education microbatteries friction couples of braking devices operating in the regimes microthermoelectric generator and microthermoelectric refrigerator, and identified the components generated by the components of the currents.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2011