

¹А. И. Вольченко, д-р тех. наук, проф.,
²М. В. Киндрачук, д-р тех. наук, проф.,
¹Д. А. Вольченко, канд. тех. наук, доц.,
³П. А. Поляков, асп.,
¹Н. И. Терлецкий, студ.

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИКЕ ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ (часть 5)

¹Ивано-Франковский национальный университет нефти и газа

²Национальный авиационный университет

³Кубанский государственный технологический университет (Россия)

Проиллюстрированы: контактное взаимодействие пар трения; износ-фрикционные свойства пар трения; терморегулирование состояния металлических фрикционных элементов в тормозных устройствах.

Введение. Современная тепловая динамика трения фрикционных узлов тормозных устройств не в состоянии дать ответы на вопросы о том, каким образом наблюдается превращение электрической энергии в тепловую и как объяснить возникновение температур (поверхностной, вспышки и объемной), как происходит инверсия токов в парах трения при переполяризации участков фрикционных накладок, материалы которых находятся в интервалах поверхностных температур ниже и выше допустимой. В данных условиях ответы на затронутые вопросы может дать только нанотрибология поверхностных и приповерхностных слоев металлических и неметаллических фрикционных элементов пар трения тормозных устройств.

Состояние проблемы. Остановимся кратко на анализе материалов, касающихся нового подхода к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств, согласно ранее опубликованных из них частей: в первой части показано влияние влаги на триботехнические параметры фрикционных узлов тормозных устройств, а также предложено устройство для принудительного удаления влаги с поверхностей пар трения барабанно-колодочных тормозов, выполняющего функции ограничителя для тепловых явлений [1]; во второй части раскрыты основы образования микро-

термобатарей в парах трения тормозных устройств, работающих в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоохладильников, а также определены составляющие генерируемых токов [2]; в третьей части распределены направления составляющих генерируемых токов в парах трения фрикционных узлов тормозных устройств и установлено их влияние на общее тепловое состояние фрикционных элементов [3]; в четвертой части раскрыты основы зарождения и возникновения явления термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов (обода) с приповерхностными слоями накладок при температурах выше и ниже допустимой для их материалов [4]. Однако, в опубликованных ранее материалах не были рассмотрены вопросы, касающиеся пар трения тормозных устройств: контактного взаимодействия; износофрикционных свойств; терморегулирование состояния металлических фрикционных элементов тормозных устройств.

Контактное взаимодействие пар трения «полимер-металл» в тормозных устройствах. В процессе торможения фрикционные элементы тормозных устройств находятся в весьма сложном взаимодействии. При этом между контактирующими элементами возникают силы трения, имеют место упругие и пластические деформации, генерируются токи, которые вызывают выделение теплоты, протекают химические реакции, происходит их взаимное изнашивание и т.п. Более полная картина контактно-термического взаимодействия пар трения тормозных устройств при различных видах механизма трения, происходящих в зонах милли, микро и нано размеров с учетом характеристик трения и их составляющих представлена на рис. 1.

Согласно классификации А.В. Чичинадзе, тормозные и передающие устройства разделяют на пять групп (колодочные, камерные, ленточные, дисковые и коньковые пары трения), которые, в свою очередь, делятся по типу микроконтактирования и коэффициенту взаимного перекрытия ($K_{вз}$). Макроконтактирование бывает внешнее ($0,1 \leq K_{вз} \leq 1,0$) и внутреннее ($0,1 \leq K_{вз} \approx 1,0$) по образующей цилиндра; по поверхностям: призмы и цилиндров ($0,1 \leq K_{вз} \approx 1,0$); призмы цилиндра и его торца ($0,1 \leq K_{вз} < 1,0$); призмы цилиндра по плоскости бесконечной длины ($K_{вз} \rightarrow 0$). В последнее время в тормозостроении у разработчиков увеличился интерес к многопарным типам фрикционных узлов.

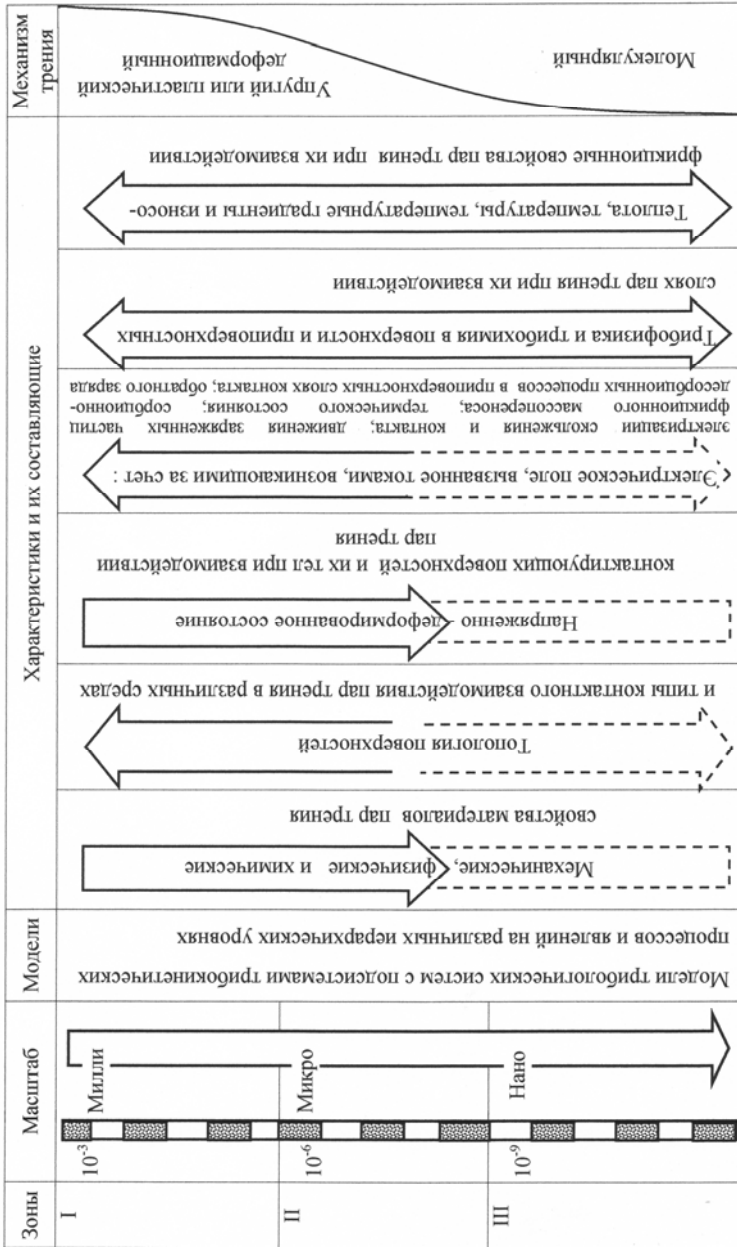


Рис. 1. Схема контактно-термического взаимодействия пар трения тормозных устройств

Поскольку в используемых парах трения тормозных устройств первичным является генерация тока, обусловленная перемещением его носителей. Таковыми могут являться электроны, положительные и отрицательные ионы и «дырки». Для того чтобы ответить на вопрос, какие из перечисленных носителей проявляют себя в рассматриваемом виде скользящего контакта, необходимо ознакомиться с его структурой. Изучая пары трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств и ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок после их длительной эксплуатации было обнаружено, что область контактов (рабочие поверхности) состоит из разных зон. В одной из них возможность перемещения носителей тока обусловлена непосредственным соприкосновением контактирующих микронеровностей пар трения. В другой зоне подобное соприкосновение нарушается появлением клиновидных зазоров (в парах трения барабанно-колодочного тормоза) из-за неравномерного износа рабочих поверхностей накладок между контактирующими элементами. Особенно большие зазоры имеют место в контактах пар трения ленточно-колодочного тормоза из-за усталостного разрушения рабочих поверхностей накладок. При этом «раны» накладок удалены от их рабочих поверхностей трения до 1,0 мм. В этом случае обеспечивается замыкание электрической цепи благодаря проводимости ионизированного воздушного зазора, а также молекул воды, образующейся при выгорании связующего с материалов фрикционной накладки. В зазорах на микроуровне происходит их заполнение продуктами износа, что и способствует возникновению электрической цепи.

Эксплуатация пар трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств, представляющих фрикционные элементы «полимер-чугун» имела политульный отблеск, благодаря наличию в составе материала обода барабана графита. Кроме того, на рабочих поверхностях фрикционных накладок наблюдались зоны в виде длинных полос, пропитанные графитом. Материал накладки являлся подложкой для графита и таким образом возникала новая структура – графен. Участки последнего имели большую электропроводимость. Что касается пар трения («полимер-сталь») ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, работающих при средних удельных нагрузках (0,6 – 0,8) МПа и поверхностных температурах (700 – 900) °С при глубоком бурении, то поверхность обода шкива имела политуру с сильным

отблеском. В то же время рабочая поверхность фрикционных накладок имела участки поверхности, которые пронизаны узором паутины со слабым политурым отблеском.

Для дальнейшего рассмотрения теории контакта в парах трения тормозных устройств необходимо оперировать следующим: в области стягивания, симметричной по отношению к контактной поверхности, джоулева теплота (RI^2), выделяющаяся в этой области, распространяется по тому же пути, что и электрический ток; электрические и тепловые сопротивления рассматриваемых приповерхностных слоев фрикционных элементов являются разными; плотность электрического тока пронизывающего приповерхностные слои фрикционных элементов является пропорциональна плотности теплового потока.

Износо-фрикционные свойства пар трения «полимер – металл» в тормозных устройствах. В энергетическом аспекте трение представляет собой процесс трансформирования поступающей в систему механической энергии в электрическую, тепловую и другие виды энергии. Перераспределение энергетических потоков на поверхностях пар трения тормозных устройств наблюдается только в процессах самого трения и поэтому необходимо развивать и использовать in-situ методы исследований.

Изучение во времени зависимостей динамического коэффициента трения фрикционных узлов тормозных устройств (рис. 2) позволяет констатировать о динамической картине общего баланса подведенной и отведенной к трибосистеме энергии.

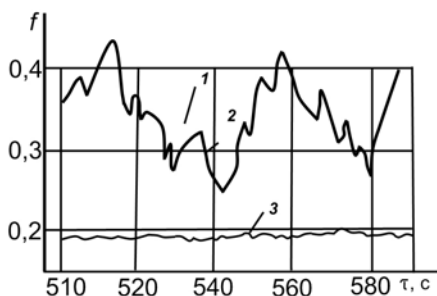


Рис. 2. Закономерности изменения во времени (τ) динамического коэффициента трения (f) для пары «металл-полимер» (при $p = 0,3$ МПа, $v = 0,6$ м/с); 1, 2 – высокочастотная и низкочастотная составляющие «сухого» трения; 3 – кривая при «мокром» трении

Внешняя работа, подводимая к трибосистеме, затрачивается на упругое и пластическое деформирования поверхностных слоев и на образование микротермобатарей, которые работают в режимах микротермоэлектро-генераторов и микротермохолодильников, и как следствие, прямого нагрева и охлаждения поверхностных и приповерхностных слоев пар трения тормозных устройств. Другие виды трансформации механической энергии при низких скоростях скольжения пар трения тормозов являются несущественными (например, излучение). Работа трения зависит от площади фактического контакта и от физико-механических и химических свойств поверхностных и приповерхностных слоев материалов пар трения тормозных устройств [5], которые упрочняются и разупрочняются в процессе трения сравнительно медленно. Поэтому часть кривой 2 (рис. 2) динамического коэффициента трения, которая описывается низкочастотной составляющей, связанная с поступающей в трибосистему механической энергией. Последняя затрачивается на ее перераспределение и обеспечение работы микротермобатарей, которые генерируют электрическую энергию с последующим ее превращением в тепловую в приповерхностных слоях элементов фрикционных узлов тормозных устройств.

Природа высокочастотной составляющей (кривая 1 на рис. 2), по нашему мнению, связана с дискретностью контакта, а высокочастотные пики динамического коэффициента трения отвечают мгновенно происходящим энергетическим процессам в контактируемых поверхностным слоях, которые являются источником теплоты и холода, за счет генерирования в них прямых и обратных токов. Кривые 1, 2 и 3 (рис. 2) содержат информацию о влиянии направления тока, генерируемого в парах трения «полимер – металл», на величину динамического коэффициента трения. При прохождении прямых микротоков от контактирующих поверхностей обода тормозного барабана к рабочим поверхностям фрикционных накладок (анодно-поляризованные поверхности накладок) f оказывается всегда больше (см. рис. 2 интервалы времени (510 – 520) с и (550 – 570) с для кривых 1 и 2), чем у катодно-поляризованных участках поверхностей накладок колодок, материал которых находится при температурах выше допустимой температуры, и при этом возникают обратные микротоки (см. рис. 2 интервал времени

(510 – 580) с для кривой 3). Причем во всех случаях f снижается с увеличением плотности тока j_n на контакте пар трения тормозных устройств. Динамический коэффициент трения катодно-поляризованных участков фрикционных накладок всегда меньше динамического коэффициента трения их анодно-поляризованных участков, т.е. ($f_a > f_k$), при возрастании j_n изменяется для разных материалов по-разному [6; 7].

Таким образом, переполяризация участков фрикционных накладок в парах трения тормозных устройств вызывает инверсию микроотоков и изменение их величин, и как следствие, изменение динамического коэффициента трения, характеризующего энергетические процессы в их поверхностных и приповерхностных слоях пар трения.

Характеристика износа определяет долговечность и многие другие эксплуатационные параметры пар трения тормозных устройств. Если работа пар трения происходит при температурах ниже допустимой для материалов фрикционной накладки, то можно утверждать, что износ их рабочих поверхностей и металлических фрикционных элементов является суммой механического (усталостного) I_m и электрического (эрозионного) $I_э$ износов:

Оценка вклада I_m в общий износ даст от 1/2 до 3/4 в зависимости от полярности рабочих поверхностей фрикционных накладок. Механический износ рабочей поверхности обода металлического фрикционного элемента составляет 5 – 10% от износа рабочей поверхности фрикционных накладок.

Расчет электрической компоненты износа $I_э$ зависит от совокупности факторов (направления тока, режима разряда между элементами контакта). Количество переносимого вещества с рабочих поверхностей обода металлического фрикционного элемента, а следовательно, и износ зависят от направления тока [7], его величины [8]. Зависимость количества переносимого вещества с различно поляризованных участков поверхностей фрикционных накладок на рабочую поверхность обода металлического фрикционного элемента, полученная методом радиоактивных изотопов, показана на рис. 3. Видно, что перенос с анодно-поляризованных участков поверхностей фрикционных накладок является более интенсивным.

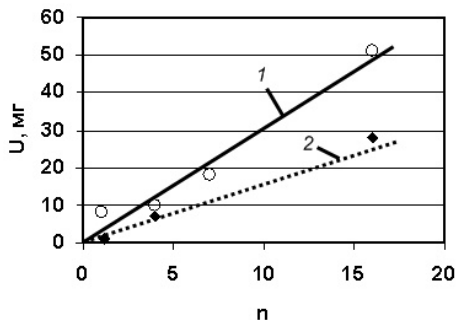


Рис. 3. Массоперенос материала между фрикционными накладками и рабочей поверхностью обода тормозного барабана при поляризации накладок: 1 – анодной; 2 – катодной

Схема зависимости, позволяющая оценить влияние режима разрядов при работе участков рабочих поверхностей накладок с искрообразованием на износ, показана на рис. 4. Любая форма самостоятельного разряда в ионизированных газах, находящихся между парами трения при их взаимодействии, сопровождается эрозией микроучастков. При тлеющем разряде преобладает износ рабочей поверхности обода металлического фрикционного элемента, а искровой разряд приводит к изнашиванию рабочих поверхностей фрикционных накладок. Переход разряда из одной формы в другую всегда сопровождается инверсией электрической составляющей износа взаимодействующих микроучастков поверхностей трения.

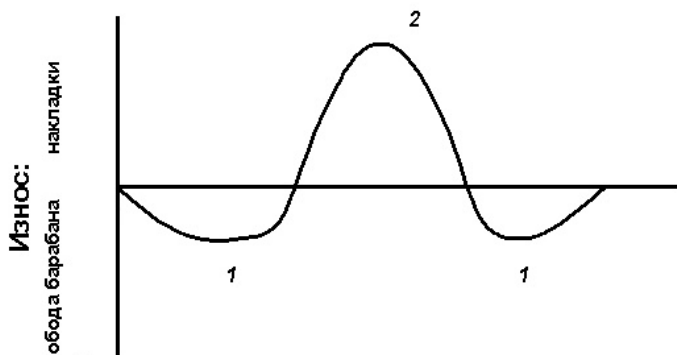


Рис. 4. Связь между режимами разряда и износом пары трения «полимер – металл»: 1 – тлеющий разряд; 2 – искровой

Скорость скольжения по-разному влияет на износ поверхностей трения фрикционных узлов тормозных устройств. Однако этот фактор нельзя отождествлять с частотой вращения металлического фрикционного элемента (тормозного барабана или шкива). Установлено, что при малых скоростях скольжения при резком увеличении частоты вращения металлического фрикционного элемента имеет место увеличение износа рабочей поверхности фрикционных накладок. Биение ободов металлических фрикционных элементов, вызванное эксцентриситетом и неравномерностью износа рабочих поверхностей их ободов, оказывает существенное влияние на скорость изнашивания, особенно в высокооборотных тормозных устройствах. Такое же влияние оказывает вибрация, вызванная низкочастотными колебаниями пар трения.

Таким образом, воздействие скорости скольжения, шероховатостей металлического фрикционного элемента, частоты вращения, биений и вибраций характерно тем, что они вызывают монотонное возрастание скорости изнашивания рабочих поверхностей накладок в узле трения.

По-иному проявляется действие удельных нагрузок на износ рабочих поверхностей фрикционных накладок задних колодок транспортного средства семейства ЗИЛ грузоподъемностью 11,0 тонн, относящегося согласно норм ЭЕК ООН к подкатегории N_3 , для испытаний типа I. Для последнего режим торможения является следующим: начальная и конечная скорости торможения составляют, соответственно, 60,0 и 30,0 км/ч; длительность цикла торможения 60,0 с, а число торможений равно 20. На рис. 5, а обозначено, что $n_1=400$ циклов торможений. Для фрикционных накладок, поляризованных за счет работы их поверхностей ниже и выше допустимой температуры, вид зависимости изнашивания $I_v=f(p)$ оказывается различным (рис. 5, а). Наличие минимума на линии $I_v(p)$ объясняется соотношением между долями электрического и механического износа и износом за счет искрообразования. По мере возрастания удельных нагрузок I_m уменьшается практически до нуля, что объясняется наличием минимума на кривой. Дальнейший рост p увеличивает доли механического изнашивания I_m .

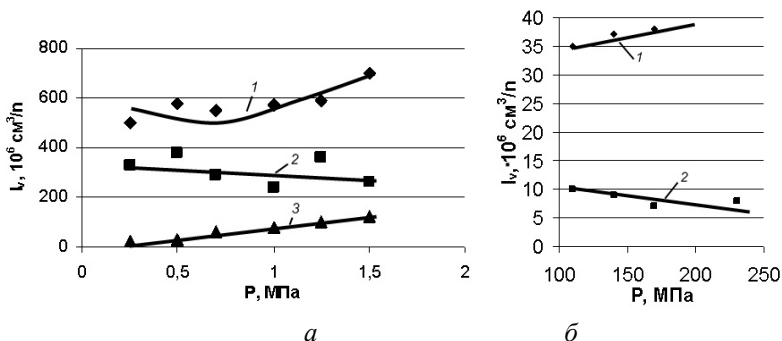


Рис. 5. Влияние удельных нагрузок (а) и поверхностной температуры (б) в паре трения «полимер – металл» на интенсивность изнашивания рабочих поверхностей накладок при их поляризации:

1 – анодной; 2 – катодной; 3 – без тока

Влияние окружающей среды на изнашивание зависит от формирования тонкой пленки, образующейся на рабочих поверхностях пар трения тормозов перед очередным торможением в результате окислительных процессов. Зависимость изнашивания от содержания водяного пара между парами трения при достижении материалами накладок выше допустимой температуры при десорбции влаги из их приповерхностных слоев, а также наличия водорода в омывающем воздухе показаны на рис. 6, а (кривые 1 и 2). На рис. 6, б (кривые 3 и 4) приведены зависимости скорости изнашивания рабочих поверхностей накладок при работе в воздухе при различных парциальных давлениях водяного пара и кислорода. Кривые, представленные на рис. 6, а, б, полученные на машине трения СМУ – 2 при нахождении пары трения «диск – колодка» в специальной камере.

Из всего вышеизложенного следует, что для улучшения стабилизации износо-фрикционных свойств пар трения тормозных устройств необходимо обеспечивать терморегулирование их металлических фрикционных элементов.

Терморегулирование состояния металлических фрикционных элементов в тормозных устройствах. В тормозных устройствах одной из важнейших проблем является поддержание поверхностных температур их пар трения в определенных пределах. Особенно это касается материалов накладок, которые при дости-

жении допустимой температуры теряют свои износо-фрикционные свойства из-за выгорания из них связующих компонентов, и в конечном итоге, наблюдается дестабилизация эксплуатационных параметров (динамического коэффициента трения, тормозного момента, механических и тепловых деформаций, износа и т.д.) тормозных устройств. В этих условиях для обеспечения требований к стабилизации температуры до ее допустимой величины для материалов фрикционной накладки необходима специальная система терморегулирования.

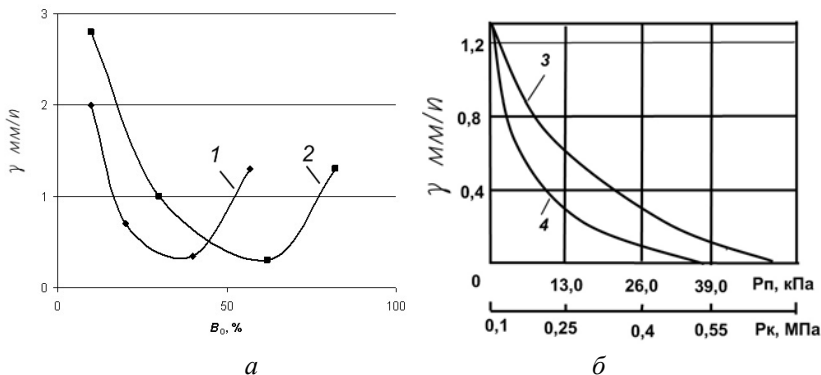


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания пары трения «полимер – металл», выполненной в виде «диска – колодки» от среды: *а* – воздушной (кривая 1); при его оптимальной влажности (B_0) и водородного (кривая 2); *б* – кислородной (кривая 3) и водяного пара (кривая 4) при парциальных давлениях p_k и p_n

Терморегулирующая система может базироваться либо на поглощении или выделении теплоты металлическими или неметаллическими фрикционными элементами тормозных устройств, либо на отводе теплоты наружу от их пар трения [8].

В первом случае могут быть использованы химические реакции применительно к материалам фрикционных накладок с выделением или поглощением теплоты, либо эффекты выделения и поглощения при изменении их агрегатного состояния (плавления, испарения, сублимации, кристаллизации и т.д.). Последний метод ограничен по своим возможностям так как он является неконтролируемым в связи с тем, что фрикционные накладки обладают

небольшим запасом составляющих компонентов для изменения их агрегатного состояния.

Большими возможностями обладают устройства и системы для принудительного отвода теплоты от пар трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств.

Известна система охлаждения барабанно-колодочного тормоза транспортного средства (А.с. 949244 СССР), в которой теплопроводные накладки колодок соединены между собой теплоизолированным теплопроводом. Последний с помощью основного теплоизолированного теплопровода соединен с верхним бачком радиатора системы охлаждения двигателя или с теплообменником, выполненного в виде радиатора с развитой теплоотводящей поверхностью, который устанавливается на кабине транспортного средства.

Одним из вариантов системы является подключение каждой теплопроводной накладки колодки с помощью теплоизолированного теплопровода с торообразной тепловой трубкой с оребрением, находящейся в строительном объеме тормозного механизма (А.с. 761768 СССР).

Наиболее простым конструктивным решением является применение пустотелых крепежных винтов (крепят накладки к основанию колодки), заполненных теплоносителем и выполняющих функции тепловой трубки. Сверху головки винтов соединены между собой теплопроводными перемычками, а снизу – оребренными трубопроводами, (патент на изобретение 222427 России).

Более оригинальной конструкцией является охлаждающее устройство, в котором в сквозные отверстия обода тормозного барабана установлены тепловые трубы, торцы которых расположены заподлицо его рабочей поверхности. Сверху тепловые трубы проходят через отверстия клиноподобной матовой пластины. Крепятся клиноподобные пластины к наружной поверхности обода барабана стягивающим кольцом (патент на изобретение 2379560С2 России). В данной конструкции решена также задача увеличения матовой площади поверхностей теплообмена за счет применения клиноподобных пластин.

Расчет температурного режима фрикционных узлов барабанно-колодочного тормоза по существу сводится к решению двух уравнений теплового баланса для:

пар трения

$$(Mc)_{\delta} \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{T - T_r}{R} + Q_{\text{вн}} + Q_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $(Mc)_{\delta}$ – эффективная средняя теплоемкость (с) обода тормозного барабана с его фланцем; M – масса обода тормозного барабана с его фланцем; τ – время нагревания; t_1, t_2 – температуры полированной и матовых поверхностей обода тормозного барабана; T – температура полированной поверхности обода тормозного барабана; T_r – температура матовых поверхностей обода тормозного барабана и его фланца; R – тепловое сопротивление элементов тормозного барабана; $Q_{\text{вн}}$ – количество теплоты, которое возникает в приповерхностных слоях полированной поверхности обода тормозного барабана; $Q_{\text{п}}$ – количество теплоты которое отводится от матовых поверхностей тормозного барабана;

различного рода теплообменников

$$(Mc)_{\delta} \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{T - T_r}{R} + \alpha A(T_{r2} - T_{r1}) - A\varepsilon\sigma T_r^4, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при воздушном или жидкостном охлаждении металлического фрикционного элемента; A – поверхность теплообмена; ε – степень черноты радиационной поверхности; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для регулирования температуры возможно воздействие на значение R , изменяя, например, расход теплоносителя, либо на значение площадей теплообмена.

Выводы. Таким образом, произведена оценка износотрибционных свойств пар трения тормозных устройств, исходя из условия анодно-катодной поляризации поверхностей фрикционных накладок. Показано терморегулирование состояния металлических фрикционных элементов в тормозных устройствах путем применения различного рода теплообменников.

Список литературы

1. Влияние влаги на триботехнические параметры фрикционных узлов тормозных устройств и ее удаление с их поверхностей трения (часть 1) / М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко, Я.Б. Сторож и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2010. – Вип. 54. – С. 95–105.

2. *Вольченко А. И.* Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 2)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55. – С.27–46.

3. *Вольченко А. И.* Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 3)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55.–С.47–64.

4. *Вольченко А. И.* Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 4)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55.– С.47–64.

5. *Хайнике Г.* Трибохимия / Г. Хайнике. Мир, 1987.–584с.

6. Трибологія / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут // – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ву «НАУ-друк.» – 2009. – 392с.

7. *Заячук Д.М.* Нанотехнології і наноструктури / Д.М. Заячук. Навч. посібник. – Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – 580 с.

8. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В.К. Кошкина. – М.: Машиностроение, 1985. – 624 с.

Вольченко О.І., Кіндрачук М.В., Вольченко Д.О., Поляков П.О., Терлецький М.І. **Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 5)**// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.:НАУ, 2012. –Вип. 57 – С. 34–47.

Проілюстровані: контактна взаємодія пар тертя; зносо-фрикційні властивості пар тертя; терморегулювання стану металевих фрикційних елементів в гальмівних пристроях.

Рис. 6, список літ.: 8 найм.

Volchenko O.I., Kindrachuk M.V., Volchenko D.O., Poliakov P.O., Terleckij M.I. **A new approach to the thermal dynamics of friction frictional braking device nodes (part 5)**

Are illustrated contact interaction of pairs a friction; runout-frictional properties of pairs a friction; thermoregulation of a condition of metal frictional elements in brake mechanisms.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2012