УДК 621.891

Д. А. ВОЛЬЧЕНКО

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

К ПРОБЛЕМЕ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В НАГРУЖЕННЫХ МНОГОПАРНЫХ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗАХ (часть вторая)

Рассмотренные материалы посвящены: элементам теории механохимического взаимодействия пар трения ленточно-колодочного тормоза; трению, изнашиванию и генерированию электрических и тепловых токов при взаимодействии микровыступов поверхностей трения.

Ключевые слова: *ленточно-колодочный тормоз, пары трения, микровыступы с пятнами контакта, диффузия, адсорбция, механохимическое взаимодействие.*

Введение. В первой части материалов статьи произведен анализ литературных источников и сформулирована проблема, рассмотрены термокинетические модели взаимодействия металлических элементов трения в многопарных узлах, а также уделено внимание диффузионным процессам.

Адсорбция и механохимическое взаимодействие. В процессе диффузии поверхностные слои насыщаются компонентами омывающей и газовой среды, что способствует возникновению на фазовой поверхности адсорбированных тонких слоев, порядка мономолекулярных. При трении последние вступают в химические реакции с твердыми поверхностями взаимодействия. Состав образовавшихся химических соединений зависит от материала пары и состава компонентов газовой среды, ее скоростных потоков, импульсных электрических и тепловых токов, их химического сродства, а также уровня энегронагруженности пары трения.

Структура процессов химического взаимодействия и влияющих на него других процессов показана на рис. 1 (как частный случай, процесс старения материалов имеет такую же структуру). При этом физические и износо-фрикционные свойства пары изменяются по мере протекания химических реакций в приповерхностных слоях ее элементов трения. Структура процессов химического взаимодействия в большей мере зависит также от интенсивности термодиффузии материалов пары.

В условиях нормального трения (без схватывания) наблюдается изменение химических и физических свойств поверхностных слоев пары, которые можно характеризовать как «старение ее поверхностей». Процесс старения поверхностей зависит от уровня энергонагруженности фрикционной пары. Он захватывает глубинные слои за счет их импульсного прошивания механическими, электрическими и тепловыми токами и определяет характер изменения не только износо-фрикционных, но и других свойств пары.

Процессы диффузии, адсорбции и химического взаимодействия происходят в поверхностных слоях материалов пар трения и при отсутствии трения. Указанные процессы носят активационный характер, их можно квалифицировать как сопутствующие трению. При этом источником энергии активации являются тепловые флуктуации в материалах металлического элемента трения, усиленных до этого процессом трения электрическими и тепловыми токами, вызванных колебаниями электронов в его структуре. Действие механической нагрузки и высокой температуры в процессе трения приводит к быстрому росту числа дефектов в структурах, интенсификации химического взаимодействия и увеличению потоков диффузии и адсорбции из газовой среды. Скорость «старения» материалов, если этот процесс имеет место, также возрастает.

Рис. 1. Структура основных процессов, изменяющих механохимическую природу поверхностных слоев при трении

Контактирование тел при трении осуществляется на пятнах контактов, химический состав которых и физическая структура подвержены непрерывному изменению в неустановившемся режиме воспроизведения состава и структуры.

При контактировании происходит адгезионное взаимодействие поверхностей микровыступов и их деформация на пятнах касания (эти процессы воспринимаются как сопротивление относительному перемещению микровыступов), а также преобразование энергий этих взаимодействий в теплоту. При взаимодействии микровыступов на пятнах касания энергия их движения расходуется на преодоление силы трения. Часть тепловой энергии и других видов энергий расходуется на химические реакции как на пятнах контактов микровыступов, так и в зазорах между ними. Динамика процессов адгезионно-деформационного взаимодействия связана с процессом контактирования. Если представить поток динамических контактов при трении в виде:

$$\Lambda(t) = \int_A \varepsilon\left(\frac{dS}{dt}\right) dA, \qquad (1)$$

то в нем потоки импульсов и диссипированной энергии на пятнах микровыступов будут равны $\Lambda(t)\Delta I_m$ и $\Lambda(t)\Delta E_m$; где ε – плотность динамических контактов при трении на единицу площади A и единицу пути S; ΛE_m – диссипированная на пятнах касания энергия при действии на них импульса взаимодействия ΛI_m; t – время процесса.

Величины $\Lambda(t)$, ΛI_m и ΛE_m зависят от физико-механических свойств материалов пары трения и условий ее нагружения.

Количественные параметры процессов контактирования, трения и генерирования электрического и теплового токов на пятнах касания пропорциональны пути перемещения:

$$N \sim S,\ W \sim S,\ I \sim S \text{ и } Q \sim S,$$

где N – импульсное действие нормальных усилий на микровыступы; W – работа сил сопротивления; I, Q – генерируемые электрические и тепловые токи.

Потоки диффузии, абсорбции и химических воздействий протекают по-иному, их общая динамическая закономерность имеет существенно другой вид:

$$m(t) \sim c_T t^n, \quad (2)$$

где c_T и n – коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материалов, структуры образующихся поверхностных пленок и в общем случае от характера деформирования. Кроме того, коэффициент c_T зависит от температуры нагревания материалов

$$c_T \sim \exp(-E/kT), \quad (3)$$

где E – энергия образования пленок; k – постоянная Больцмана; T – температура нагревания.

Общим в структуре потоков для всех процессов, явлений и эффектов при трении, если рассматривать интегральные потоки, является то, что они содержат в качестве второго масштабного фактора (фактора экстенсивности) величины тех площадей, на которых осуществляются процессы. Для адгезионного взаимодействия, деформирования, генерирования электрических и тепловых потоков необходимо учитывать также масштабный фактор площадки.

Диффузия, адсорбция и химические реакции происходят на всей площади поверхности трения, однако интенсивность на номинальной, контурной и фактической площадях существенно различается.

Реология контурных площадок микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар. При исследовании электротермомеханического трения рассматривают механические, электрические и тепловые нагрузки, отнесенные к номинальной, контурной и фактической площадям контакта. Так, например, суммирование составляющих генерируемых токов на пятнах фрикционного контакта осуществляется до тех пор, пока сохраняется дискретность контакта и фактическая площадь контактирования мала по сравнению с номинальной ($A_r \leq A_0$).

Контурная площадка на полимерном элементе пары трения подвергается множественному импульсному воздействию на пятнах касания со стороны сопряженного с ним металлического элемента. Это воздействие воспринимается всей контурной площадью как нормальная сила, представляющая собой некоторую случайную функцию времени. При этом материалы проявляют различные реологические свойства под нагрузкой на пятнах контактов микровыступов под воздействием нормальных и тангенциальных нагрузок, у одних проявляются свойства сверхпластичности материалов, у других контурные площадки сохраняют упругие свойства (термоупругость волн микронеровностей). При достаточно высоких механических, электрических и тепловых нагрузках следует ожидать на поверхности трения явления ползучести материалов. При этом процессы формирования макрогеометрии контакта, процессы контактирования и другие процессы при электротермомеханическом трении приобретают своеобразный характер [1; 2]. Основная особенность происходящих явлений связана со специфическими закономерностями перемещения контурных площадок, образованных в результате ползучести материалов.

Трение, изнашивание и генерирование электрических и тепловых токов является единым полем взаимодействия пятен микровыступов металлополимерных пар трения. Это единое поле можно представить в виде замкнутого цикла, совершаемого каждым из пятен контакта микровыступов в паре над материалом сопряженной поверхности пятна контакта. Циклы многократно повторяются и состоят из двух групп, условно объединенных в процессы (рис. 2).

Рис. 2. Развернутая структура повторно воспроизводимого цикла механохимического нагружения материалов при электротермомеханическом трении и наблюдаемые эффекты

При многократном повторении цикла материалы поверхностей трения постепенно изменяют свое состояние и свои свойства. Первая группа процессов представляет собой «рабочий» цикл собственно электротермомеханического трения в едином поле. Вторая группа процессов включает в себя сопутствующие трению и происходящие на полях взаимодействия пятен микровыступов изменения свойств материалов.

Процессы в каждой из групп сопровождаются электрическими и тепловыми эффектами, отличающимися масштабами и физическим содержанием. В первом случае – электрический эффект, способствующий интенсификации явления проводимости приповерхностных слоев полимерной накладки, что вызывает активизацию ее энергетических уровней. Во втором случае – тепловой эффект, который сводится к диссипации энергии при трении с точностью до величины энергии активации процессов упрочнения адгезионных связей и их разрушения с изменением структуры материалов. При этом затраты энергии также идут на активацию процессов диффузии, адсорбции компонентов омывающей среды и механохимического взаимодействия. Представление комплексности электротермомеханического трения, как совокупности сложных процессов, последовательно происходящих на взаимодействующих полях, в виде двух групп возможно, благодаря различным временным масштабам. При этом наблюдается существенное различие при взаимодействии механических, электрических, тепловых и химических полей.

Особую группу наблюдаемых при электротермомеханическом трении процессов представляют собой явления и эффекты, возникающие в результате трения.

Таким образом, электротермомеханическое трение, сопутствующие ему и возникающие при трении процессы, явления и эффекты могут быть представлены в виде единой структурно-логической схемы, основу которой составляют циклы нагружения (первая группа процессов), причем свойства материалов постоянно (от цикла к циклу) изменяются (вторая группа процессов). С каждой из групп процессов, образующих единый сложный цикл в едином поле взаимодействия, связаны возникающие процессы, явления и эффекты, которые не могут

изменить содержание цикла первой группы процессов, а лишь влияют на их интенсивность. Однако все процессы второй группы и сопровождающие их явления и эффекты оказывают более существенное влияние и могут изменить характер действия механических, электрических, тепловых и химических токов.

Суммарная продолжительность процессов второй группы непосредственно на контурных площадках в местах возникновения пятен касания при n-кратном повторении циклов равна:

$$t_2 = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{2i} \ , \tag{4}$$

поскольку

$$\Delta t_{2i} >> \Delta t_{1i}, \tag{5}$$

где n – число рассматриваемых циклов (импульсных взаимодействий); Δt_{2i} – длительность процессов второй группы в i-ом цикле; Δt_{1i} – то же, для процессов первой группы (Δt_{2i} и Δt_{1i} – случайные величины статистического характера).

Таким образом, не только процессы первой, но и второй групп следует рассматривать как дискретные в пространстве и во времени, так как эти процессы многократно перерываются первыми. Условие (5) допускает рассмотрение процессов этой группы на пятнах контактов и на контурной площади в целом как непрерывные, если характер анализа не требует обратного.

Процессы первой группы отражают основное взаимодействие полей пятен контактов металлополимерных пар трения, процессы второй группы – сопутствующие электротермомеханическому трению. Такие процессы как электро- и термогенерирование, изменение свойств поверхностных слоев, их изнашивание и ряд других не являются структурно самостоятельными процессами. Эти процессы являются составляющими явлений и эффектов, поэтому структура этих процессов совпадает просто со структурой собственно процесса трения. Механизм, включающий в себя процессы первой и второй групп, отражает одновременно структуру всех явлений и эффектов.

Основные явления и эффекты, которые приходится рассматривать с целью обеспечения работоспособности металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза, включают в себя: сопротивление перемещению с учетом податливости стыков, электро-теплогенерирование, изменение структуры материалов и их свойств, изнашивание (разрушение поверхностей), процессы массопереноса, возможное нарушение нормальных условий трения (расплавление, схватывание контактов микровыступов и т.д.), а также другие явления и эффекты.

Существенным фактором при анализе явлений и эффектов являются скорости связанных с ними процессов (процессы первой группы – это быстропротекающие процессы, второй группы – с умеренными скоростями).

Например, сопротивление перемещению микровыступов контактными площадями, их податливость и электро- и теплогенерирование являются явлениями и эффектами, проявляющимися в каждом отдельном цикле взаимодействия микровыступов на пятне касания. Для изменения структуры материалов и изнашивания требуется накопление большого числа таких циклов. Первые необходимо рассматривать как быстропротекающие процессы, вторые – с малой скоростью, точнее со «средней» скоростью (на контурных площадках). Эти особенности физико-химических процессов при трении оказывают влияние на процесс контактирования и обусловливают переменный характер микросвойств тел и структуры циклов нагружения поверхностей.

Процессы электротермомеханического трения как совокупность взаимосвязанных процессов, явлений и эффектов на смещающихся усредненных траекториях контурной площади. Усредненные траектории движения контурных площадок являются «траекториями» процессов трения, изнашивания, электро- и теплогенерирования, а также траекториями, на которых интенсифицируются все остальные процессы при трении (диффузия, адсорбция, механохимическое взаимодействие и т.д.). Поэтому все процессы, явления и эффекты при трении по своей динамике и интенсивности приобретают характер случайных, происходящих в строгой последовательности и в комбинационной связи полей «механического-электрического», «механического-теплового», «механического-химического», «электрического-теплового», «химического-теплового», «химического-электрического», «электрического-магнитного». Кроме того, они реализуются на смещающихся усредненных траекториях контурной площади.

Особый интерес представляет образование и работа инверсионного слоя на поверхностях трения металлополимерных пар.

С окисных пленок на поверхности накладок, благодаря попаданию на них металла за счет массопереноса, формируется полупроводниковые элементы с инверсионным слоем, в котором равновесная концентрация неосновных носителей больше, чем основных. Инверсионный слой возникает, когда поверхность полупроводника *n*-типа (*p*-типа) по отношению к объему находится под достаточно большим отрицательным (положительным) потенциалом:

$$\varphi > \frac{2kT}{e}[\ln {p_0}/{n_0}], \tag{6}$$

где e – заряд электрона; n_0 и p_0 – концентрация электронов и дырок в объеме полупроводника; k – постоянная Больцмана.

Инверсионный слой реализуется вблизи контакта «полупроводник-металл», когда работа выхода электронов из металла превышает работу выхода электронов из полупроводника более, чем на ширину запрещенной зоны полупроводника при наличии поверхностных состояний, захватывающих основные носители. Если толщина инверсионного слоя меньше длины свободного пробега носителей, то в нем возможно образование квазидвухмерной проводимости, что улучшает электрические свойства контакта.

Известная схема расчета температур в паре при трении $T = T_{об} + T_{всп}$ (где $T_{об}$, $T_{всп}$ – температуры: общая поверхностная и вспышки) не отражает фактической динамики теплового поля, поскольку не учитывает составляющих генерируемых электрических токов на микровыступах поверхностей трения металлополимерных пар. Более близка к реальной расчетной схеме зависимость: $T = T^* + T_{всп}$, где T^* – температура, достигаемая на поверхности за счет трибоэффекта.

Однако для тяжелонагруженных режимов трения с жесткими малоизнашивающимися материалами (ФК-24 А – сталь 35ХНМ) она должна быть заменена схемой с движущимися (смещающимися) источниками теплоты на усредненных траекториях контурной площади. При этом

$$T = T^{макс} = T_c^p + T_{всп}^{макс} = const, \tag{7}$$

где T_c^p – равновесная температура на термоупругой волне; $T_{всп}^{макс}$ – максимальная температурная вспышка.

При торможении количество вспышек на контурной площадке A_C, возникающее в единицу времени на единицу пути, равно:

$$\frac{dN}{dt} = \varepsilon A_C \frac{dN}{dt}. \tag{8}$$

Тепловой поток на контурной площадке при этом равен:

$$q_C = \frac{1}{A_C}\frac{dN}{dt}\Delta E_m^* = \varepsilon \Delta E_m^* \frac{dS}{dt}. \tag{9}$$

Учитывая малые поперечные размеры контурной площадки b_C, а также размеры пятен контактирования и их дискретный характер, можно остановиться на линейной модели для контурной площадки как электротеплового источника, перемещающегося по номинальной поверхности

$$q_C{}' = q_C b_C \frac{dN}{dt}\Delta E_m^* = \frac{A_C}{l_C}\varepsilon \Delta E_m^* \frac{dS}{dt}, \tag{10}$$

где $\frac{1}{l_C}\frac{dN}{dt}$ – линейная плотность импульсных взаимодействий на контурной площадке.

Значения T_c^p в (7), dN/dt и $q_C b$ в (8)-(10) – это температура, количество электро- и термовспышек и генерируемый тепловой поток на случайных усредненных траекториях термоупругой микроволны, причем $T_c^p = const$ и

$$\frac{dN}{dt} \approx \frac{dN_0}{dt}\left(1 - \frac{t}{t_T}\right), \qquad q \approx \left(1 - \frac{t}{t_T}\right).$$

Случайная усредненная траектория для процессов при трении описывается функцией смещения $r(t)$ [1].

Средняя поверхностная температура в любой фиксированный момент времени является случайной величиной, чего нельзя сказать об объемной температуре металлического элемента трения.

Как видно из уравнения (10), движущаяся температурная волна со случайной структурой перемещения, обеспечивающая импульсный подвод теплоты, обусловливает более жесткий тепловой режим поверхностей, чем полученный из расчета средних поверхностных температур, и более «мягкий» режим при длительном подводе теплоты [5].

Таким образом, при рассмотрении теплового поля металлополимерных пар трения необходимо учитывать импульсный и длительный подвод теплоты к их поверхностям. Кроме того, расчетные зависимости должны отражать связь темпов нагревания и вынужденного охлаждения металлического элемента трения с поверхностными градиентами температуры и градиентами температуры по его толщине.

На основании обобщения представленного материала и введения в него новых идей и гипотез применительно к различным полям взаимодействия металлополимерных пар трения тормозов сформирована табл.

В ней приведены основные и дополнительные характеристики материалов пары трения, параметры и условия ее нагружения в полях взаимодействия металлополимерных пар трения тормозных устройств. Представленная таблица не претендует на полную информацию о полях взаимодействия. Однако она служит отправным рубежом для дальнейшей разработки теории поля применительно к парам трения тормозных устройств, закладывая фундамент новому перспективному направлению в науке.

Таблица

Основные и дополнительные характеристики материалов пары трения, параметры и условия ее нагружения в полях взаимодействия

Поля взаимодействия	Характеристики, параметры и условия	
	Основные	Дополнительные
Механическое	Удельные нагрузки; деформации; напряжения; прочность; ползучесть; твердость; градиент механических свойств.	Условия: независимости поля; распределения удельных нагрузок.
Тепловое	Термоупругость; температуры: вспышки, поверхностная и объемная; тепловой поток и коэффициенты его распределения; темпы нагревания и охлаждения; градиенты температуры.	Условия: термического сопротивления; подвода и распределения тепловых потоков; теплообмена при омывании средой; возникновения эффектов Пельтье и Томпсона.
Электрическое	Токи*: I_T, I_{CK}, I_{TC}, I_M, $I_Д$; энергия: W_M, $W_П$; разность потенциалов φ_1-φ_2; дополнительные токи.	Токи I_a, I_r; диэлектрические потери $tg\delta_1 = I_a/I_r$.
Электромагнитное	Напряженность электрического поля E; магнитная индукция B; ε и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; потенциалы электрического (φ) и магнитного (A) полей; фазовая скорость волны.	Условия: электромагнитного сопротивления; соблюдения уравнений Максвелла и преобразования Лоренца.
Химическое	Реакции и их скорости: окисления, восстановления, коррозии, катализу, гальванические; хемосорбция: ковалентная, ионная и физическая сорбция; деструкция приповерхностного слоя; фазовые переходы I-го и II-го рода; химический потенциал	Переходные процессы между скоростями доставки и потребления активных компонентов среды в зону трения; конвективные процессы теплообмена.

***Примечание:** I_T, I_{CK}, $I_Д$ – суммарные токи: термический; возникающие за счет трения и контактного взаимодействия; обусловленные сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях накладки при температуре выше допустимой для его материалов; I_{TC}, I_M – составляющие суммарного тока: возникающие за счет трения скольжения; образованные движением.

Выводы. Рассмотрены элементы электротермомеханического трения в нагруженных микровыступах многопарного ленточно-колодочного тормоза с учетом возникновения механических, электрических, тепловых и химических полей, взаимосвязанных между собой.

Список литературы

1. Мусалимов В.М. Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191с.
2. Хайнике Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – Мир, 1987. – 584 с.
3. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248 с.
4. Градиентные полимерные материалы / [А.А. Аскадский, Л.М. Голенева, К.А. Бычко и др.] Рос. хим. ж. (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2001, m/XLV, №3. – С.123–129.
5. Джанахмедов А.Х. Темпы нагревания металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты в ленточно-колодочном тормозе [А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко и др.] // Проблемы трения и изнашивания: науч.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. – Вып. 2(61). – С.20–27.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2013

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО

ДО ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ТЕРТЯ В НАВАНТАЖЕНИХ БАГАТОПАРНИХ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМАХ (частина друга)

Розглянуті матеріали присвячені: елементам теорії механохімічної взаємодії пар тертя стрічково-колодкового гальма; тертю, зношуванню і генеруванню електричних і теплових струмів при взаємодії мікровиступів.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, пари тертя, мікровиступи з плямами контакту, дифузія, абсорбція, механохімічна взаємодія.

D. O. VOLCHENKO

TO PROBLEM OF ELECTRO-THERMO-MECHANICAL FRICTION IN THE LOADED MULTIPAIRS SHOES BAND-BLOCK BRAKES (part II)

The considered materials are devoted: to the elements of theory of mechanical and chemical co-operation of pairs of friction of band-block brake; to the friction, wear and generuting of electric and thermal currents at co-operation of microledges of surfaces of friction.

Keywords: band-block brake, multipair friction units, pairs of friction, microledges with the spots of contact, diffusion, adsorption, mechanochemical co-operation.

Вольченко Дмитро Олександрович – д-р техн. наук, професор кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ.