

УДК 621.891

Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна***ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТЬ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

Энергонагруженность металлополимерных пар при электротермомеханическом трении рассмотрено с позиций энергетических уровней различных типов контактов, температурных вспышек на пятнах контактов микровыступов, определения времени контактно-импульсного взаимодействия, а также практической концентрации электрических и тепловых токов на пятнах контактов.

Ключевые слова: *энергонагруженность, пары трения, тормозное устройство, элементы трения, электромеханическое трение, поверхностный и приповерхностных слой, энергетический уровень.*

Введение. При реализации в металлополимерных парах электротермомеханического трения возникает трибоэлектрический эффект, который ухудшает антифрикционные свойства взаимодействующих материалов, увеличивая силу трения на 15 – 50 % и износ в несколько раз [1]. В настоящее время подавление трибоэлектрических эффектов является одной из основных задач трибологии. Для того чтобы подавить трибоэффект необходимо изучить и установить закономерности его зарождения, развития и реализации на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении.

Состояние проблемы. Многочисленные исследования, касающиеся дискретности контакта [1; 2; 3], контактно-импульсного взаимодействия [4; 5; 6], генерирования электрических и тепловых токов [5; 7], подвода теплоты к контактам в виде импульсного и длительного нагружения [6] микровыступов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении в тормозных устройствах позволили установить, что генерирование температуры вспышек на пятнах контактов микровыступов связано с дискретностью их контакта, возникновением электроимпульса, и как следствие, электрического разряда между пятнами контактов.

Суммирование электрических и тепловых токов на фрикционном контакте применимо до тех пор, пока сохраняется дискретность контакта и фактическая площадь контактирования мала по сравнению с номинальной ($A_r \ll A_a$) [8].

Когда неровности под влиянием прошивающих электрических токов и температуры размягчаются $A_r \rightarrow A_a$, $t_{act} \rightarrow 0$ и температура контакта определяется как средняя температура поверхности, которая усилена трибоэффектом. При этом происходит изменение вида контактирования – от дискретного к сплошному [9].

В металлополимерных парах трения два материала различны и поэтому электрические и термические возмущения, включающие флуктуацию удельных нагрузок, электрических и тепловых токов, движутся вдоль поверхности взаимодействия со скоростью отличной от скоростей распространения вдоль поверхностей каждого из материалов. Заметная разница в коэффициентах теплопроводности двух материалов ведет, однако, к возмущению, которое сконцентрировано в металлическом фрикционном элементе с более высоким коэффициентом температуропроводности, проникающим в него на большую глубину из-за большей части теплоты, направляемую в эту поверхность (рис. 1). Что касается полимерного фрикционного элемента, то в нем происходит все наоборот (рис. 2), но при этом необходимо помнить, что материалы полимера выступают электретами с ионами и электронами, которые являются возмущителями при увеличении энергетического уровня поверхностного слоя полимерной накладки.

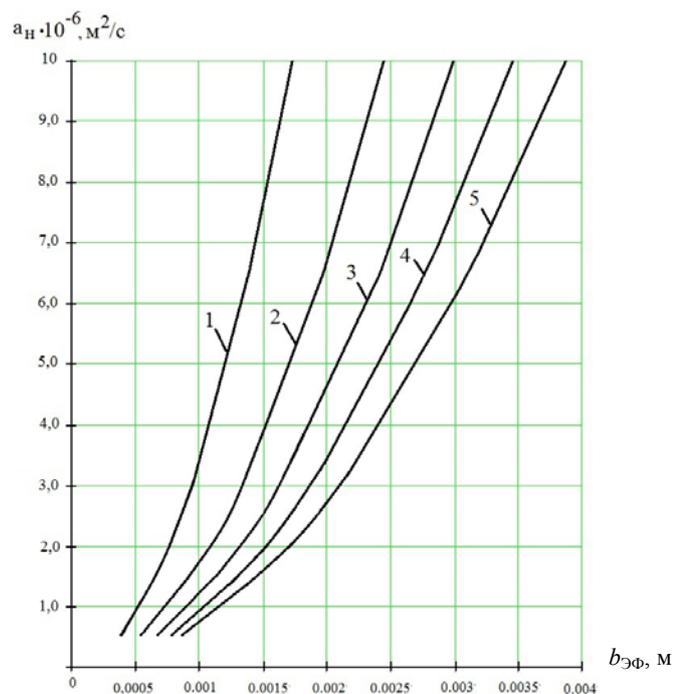


Рис. 1. Закономерности глубины проникновения теплоты в приповерхностный слой обода шкива в зависимости от величины коэффициентов теплопроводности его материалов за время: кривая 1 – $\tau = 0,1 \text{ c}$; кривая 2 – $\tau = 0,2 \text{ c}$; кривая 3 – $\tau = 0,3 \text{ c}$; кривая 4 – $\tau = 0,4 \text{ c}$; кривая 5 – $\tau = 0,5 \text{ c}$

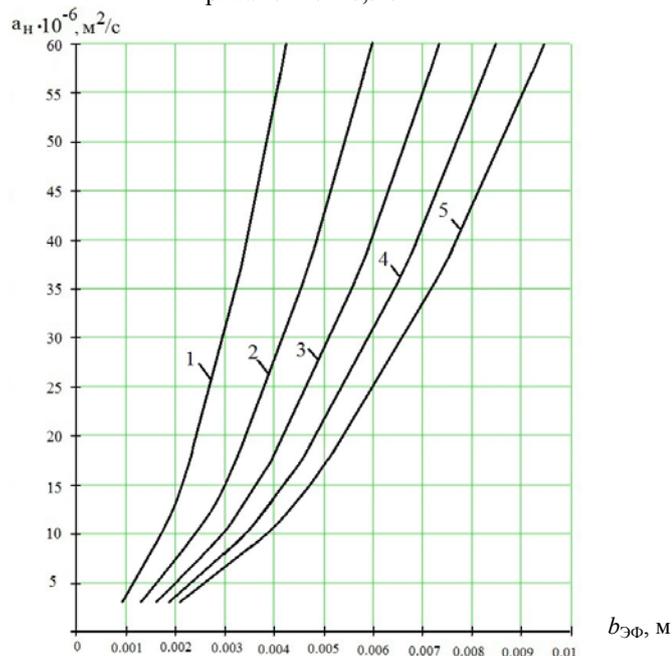


Рис. 2. Закономерности глубины проникновения теплоты в приповерхностный слой фрикционной накладки в зависимости от величины коэффициентов теплопроводности ее материалов за время: кривая 1 – $\tau = 0,1 \text{ c}$; кривая 2 – $\tau = 0,2 \text{ c}$; кривая 3 – $\tau = 0,3 \text{ c}$; кривая 4 – $\tau = 0,4 \text{ c}$; кривая 5 – $\tau = 0,5 \text{ c}$

Энергетические уровни различных типов контактов. Из классической механики известно, что при взаимодействии твердых тел возможны с различными геометрическими и динамическими характеристиками следующие типы контактов: точечный, линейный, герцевский и негерцевский (отсутствует и присутствует трение скольжения), с отставанием по фазе распространения и термоупругий. В то же время при исследовании контактно-импульсного фрикционного взаимодействия различают по энергетическим уровням следующие типы контактов: нейтральный, омический или инжектирующий, блокирующий.

При электротермомеханическом трении наблюдается изменение структуры поверхностных слоев металлополимерных пар, исходя из того какими являются их пятна контактов. При этом рабочая поверхность фрикционной накладки взаимодействует с: ювенильной и неювенильной поверхностью, и окисно-неокисными пленками металлического фрикционного элемента, а также перенесенным на его поверхность слоем фрикционного материала. Указанное взаимодействие пар трения «металл – полимер» и «полимер – полимер» и определяют тип контакта и его энергетический уровень. Характеристикой последнего того или иного контакта является работа выхода электронов их приповерхностного слоя металлического фрикционного элемента (W_m) и ионов, и электронов (в меньшей степени) из поверхностного слоя полимерной накладки (W_n). При электротермомеханическом трении, несмотря на состояние поверхности фрикционной накладки (ниже или выше допустимой температуры для ее материалов) происходит накапливание зарядов на границе взаимодействующих материалов, что способствует их электризации. Носители зарядов будут или собираться вблизи данной межфазной границы, или наоборот, удаляться от нее в зависимости от того какой из двух токов проводимости больше: притекающих к границе зарядов или уходящих от нее. Различия в локальных токах проводимости проводят также к диссипации зарядов при последующем проведении термостимулированных разрядов, так как в этом случае токи текут уже в противоположных направлениях. Для процессов нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства контактов взаимодействия (нейтрального, омического или инжектирующего, блокирующего).

Проанализируем каждый из типов контактов, исходя из их энергетических уровней. Нейтральные контакты не препятствуют нейтрализации зарядов, поступающих из приповерхностного слоя металлического элемента трения в течении термостимулированного разряда. То же можно сказать и об омических контактах, хотя в этом случае добавляется возможность инжекции носителей противоположного знака внутрь заряженной поверхности накладки. Блокирующие контакты действуют противоположным образом: они препятствуют как инжекции, так и нейтрализации зарядов. Таким образом, если контакты заблокированы, нейтрализация должна протекать внутри металлического элемента трения независимо от вида контакта (является он инжектирующим электроны или блокирующим). Это зависит лишь от того, какая из работ выхода электронов или ионов больше: металлического или полимерного фрикционного элемента. Если работа выхода из первого элемента больше, чем со второго, образуется блокирующий барьер. Наличие последнего позволяет изучать методом термостимулированного разряда полуизоляторы и полупроводники, которым свойственны большие токи проводимости.

Температурные вспышки на пятнах контактов микровыступов. Дефекты поверхностей и неоднородность физических структур оказывают влияние на макросвойства, наблюдаемых на пятнах контактов микровыступов. Очевидно, что влияние указанных факторов на уровне микросвойств каждого фактического пятна касания оказываются еще более существенными. Учет влияния дефектов поверхностей и неоднородностей физических структур на уровнях пятен касания и описание импульсных электрических и тепловых токов как случайных процессов вызывают значительные трудности, поскольку существующие модели элементов теории теплопередачи («металлический фрикционный элемент – третье тело (рабочий слой) – неметаллический фрикционный элемент») [9] носят детерминированный характер.

Случайный характер процессов импульсных электрических и тепловых токов, формирующие поля температурных вспышек на пятнах контактов микровыступов проявляется в трех аспектах: в характере динамики процесса вспышки и в динамике распространения теплоты в зоне вспышки; в статической стабильности максимальных величин температур вспышки.

Явление ползучести материалов пятен контактов микровыступов со статически стабильной скоростью v_r предопределяет необходимое условие в отношении математического ожидания для максимальных температур на волне $m(t_c)^v = \text{const}$, в детерминированных моделях можно принять для равновесных температур на волне $t_c = \text{const}$.

Стабильность основных процессов на волне при неравномерном распределении удельных нагрузок на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения, которая обуславливает равновесность температур на волне t_c , предопределяется допустимым состоянием пластически деформируемых материалов. Поэтому в зоне вспышки для статических моделей следует принять:

$$m(t_{\Sigma I_{um}}^{\text{макс}}) + m(t_{\text{всн}}^{\text{макс}}) = \text{const},$$

для детерминированных

$$t_{\Sigma I_{um}}^{\text{макс}} + t_{\text{всн}}^{\text{макс}} = \text{const},$$

где ΣI_{um} – составляющие суммарных токов, генерируемые на пятнах контактов микровыступов, превращаемые в теплоту, которая повышает их тепловое состояние; m – количество пятен контактов.

Температурное поле, усиленное импульсными электрическими токами, в зоне вспышки записывается в связанной с пятнами контактов системой координат следующим образом [8]:

$$\Delta t = \frac{\varepsilon \Delta E_m^*}{k(\pi \alpha \tau)^n} e^{-r^2/4\alpha \tau}, \quad (1)$$

где ε – коэффициент, учитывающий неравномерность нагружения поверхностей; k и n – статические параметры, характеризующие свойства материалов пары, связанные с наличием дефектов структуры поверхностей; α – коэффициент температуропроводности материалов, определяющие движение волны; τ – время процесса; r – расстояние от вспышки.

В безразмерной форме:

$$\Delta t_{\text{всн}} = \frac{\Delta t_{\text{всн}}}{\Delta t_{\text{всн}}^{\text{макс}}}. \quad (2)$$

В зависимости (2) пятно контакта моделируется кругом малых размеров с радиусом равным $\sim \kappa_{\text{ф}} \Delta l$, где $\kappa_{\text{ф}}$ – фактический параметр; Δl – изменение длины пробега волны.

Оценим интервал изменения выше перечисленных параметров из следующих соображений. Если вспышка (импульс на пятне) происходит на поверхности в зоне вдали от дефектов, то $\kappa = 8,0$; $n = 1,5$; для вспышки, окруженной по периметру глубокой трещиной $\kappa = 2,0$; $n = 0,5$. Коэффициент ε учитывает неравномерность нагружения поверхностей; в центре контурной площадки $\varepsilon > 1,0$, на ее границе $\varepsilon \rightarrow 0$.

Таким образом, из структуры формулы (1) следует, что при электромеханическом трении пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения (с дефектами структуры) их энергонагруженность выше и более неравномерная из-за поверхностных градиентов. Параметр ΔE_m^* отражает интенсивность электрических и тепловых токов на пятне контактов микровыступов, которые в значительной степени зависят от «теплораспределения» в паре.

Определение времени контактно-импульсного взаимодействия металлополимерных пар трения. До настоящего времени вопросы контактно-импульсного взаимодействия металлополимерных пар трения рассматривались независимо от времени. При этом предложенные исследователями модели фрикционного взаимодействия имели квазистатический характер. Однако, контактно-импульсное взаимодействие необходимо рассматривать не только как процессы неравномерного движения, обуславливающего предварительное смещение пятен контакта, но и кинематическую и динамическую зависимости параметров трения от мгновенной скорости скольжения, изменяющейся непрерывно в процессе торможения.

В общем случае для оценки реологии фрикционного контакта необходимо различать временные интервалы, которые приведены в табл. 1.

В последней использованы следующие обозначения: l_{κ} и l_n , l_o и l_{cm} – средние: протяженности участков взаимодействия и зоны номинального контакта в направлении скольжения; расстояния между участками фактического касания и до очередного номинального контакта; h – толщина пленки; V , V_u и V_e – скорости: скольжения; изнашивания и средняя регенерации пленки.

Циклы повторяющихся контактов отнесены ко времени t_{II} , а остальные периоды времени – к случайным контактам. При этом t_c , t_o и t_u , t_e определяются геометрическими параметрами и мгновенной скоростью, соответственно, в тангенциальном и нормальном направлениях (см. табл. 1).

Под термином усталость обычно понимают особый вид разрушения, вызываемый повторно действующими циклами напряжений, амплитуда которых не превышает предела упругости материала. Усталостная теория износа была предложена И.В. Крагельским, которая базируется на следующих принципах:

- контакт двух тел дискретен из-за шероховатости и волнистости трущихся поверхностей;
- изнашивание происходит в зонах фактического контакта;
- в области пятен контакта возникают соответствующие напряжения и деформации;
- фиксированный объем материала испытывает при трении многократно повторяющиеся импульсные воздействия электрического, магнитного и теплового характера.

Таблица 1

Среднее время сопутствующих эффектов, процессов и явлений в зонах взаимодействия элементов трения

Среднее время:	Зависимость	Сопутствующие эффекты, процессы и явления, протекающие под воздействием и вследствие:
элементарного контактирования при фактическом касании	$t_c = \frac{l_k}{V}$; (3)	импульсной нормальной и тангенциальной силы (с мгновенным динамическим коэффициентом трения); импульсных удельных нагрузок; податливости контактного пятна; контактно-электротермосопротивления стыка; формирования двойных электрических слоев; импульсных электрических и тепловых токов; напряженно-деформированного состояния; электро- и термостимулированных процессов поляризации; изменения структуры поверхностных слоев и их усталостного состояния
отсутствия фактического касания между двумя последовательными участками	$t_0 = \frac{l_0}{V}$; (4)	остаточных полей напряженно-деформированного и теплового состояний; протекания тепловых (охлаждения) и химических (окислительных, сорбционных и др.) процессов; термостимулированной деполяризации; регенерации пленок
изнашивания пленки	$t_{и} = \frac{h}{v_u}$; (5)	напряженно-деформированного состояния; электрических и тепловых полей; электрических и тепловых токов поляризации и деполяризации; электротермического стимулированного разряда; слагаемых механического, электрического и теплового истирания; изменения структуры поверхностных слоев пленки
регенерации пленки	$t_{в} = \frac{h}{V_e}$; (6)	процессов: окисления, адсорбции, диффузии, растекания и др.; изменения структуры пленок и их свойств
контакта номинальной площади	$t_{м} = \frac{l_n}{V}$; (7)	наличия контактов: инжектирующих; омических; нейтральных; удельных нагрузок; напряженно-деформированного состояния; внешних и внутренних электрических полей; электрических и тепловых токов поляризации и деполяризации; химического потенциала; импульсных (разрядных) токов; изменения структуры поверхностных слоев
пауз между двумя последовательными циклами номинального контакта.	$t_{п} = \frac{l_{см}}{V}$; (8)	окислительных процессов; охлаждения; тепловых токов; термически стимулированной поляризации и деполяризации.

Усталость – это локальный процесс, который сопровождается локальным изменением микронапряжений. Подтверждение усталостной теории износа имеет место в тех экспериментальных исследованиях металлополимерных пар трения, в которых наблюдаются аналогия с объемным усталостным разрушением, причем, можно построить графические зависимости, аналогичные кривым Веллера для усталости при объемном нагружении. При усталостном виде разрушения по-

верхности скорости процессов, обуславливающих явления усталости, превышают скорости других процессов, протекающих на поверхности трения, поэтому процесс усталостного разрушения становится преобладающим.

Практическая интерпретация электрических и тепловых токов на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения. Глубокое изучение процессов, явлений и эффектов, имеющих место в металлополимерных парах трения тормозных устройств позволили дополнить и расширить знаменитую триаду И.В. Крагельского, исходя из современных достижений нанотрибологии, в зависимости от энергонагруженности поверхностных и приповерхностных слоев металлического фрикционного элемента и фрикционной накладки (ниже и выше допустимой температуры для ее материалов) и рассмотреть три последовательных и взаимосвязанных стадии процесса трения, а именно:

– импульсное взаимодействие микровыступов поверхностей с генерированием электрических и тепловых токов с учетом влияния линий токов скоростного поля омывающих сред;

– при различных энергетических уровнях поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения зарождаются, развиваются и совершаются процессы и явления в строгой последовательности и с соблюдением переходных процессов, принципов суперпозиции и с возникновением побочных эффектов и при этом закономерности изменения линий токов динамического, электрического, магнитного, теплового и химического полей во взаимодействии с линиями токов скоростного поля омывающих сред подчиняются волновой природе со сдвигом по фазе;

– разрушение микровыступов за счет электротермомеханического сопротивления дискретных контактов с различной энергетической активностью микроконденсаторов и – термобатарей с мгновенным их переключением при изменении площадей пятен контактов микровыступов и градиента механических свойств, а также темпов проникновения взаимодействующих между собой импульсов электрического и теплового токов, способствующих интенсивному износу микровыступов при поляризации их пятен контактов, ведущей к дестабилизации динамического коэффициента трения металлополимерных пар трения.

Дополнить и расширить триаду А.В. Чичинадзе, регламентируя при этом следующие характеристики электротермомеханического трения и износа:

– свойства поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения и омывающей среды;

– микро- и макрогеометрию микровыступов контактно-импульсного взаимодействия с учетом нанотрибологии протекающих процессов на электронно-ионном уровне и коэффициентов взаимного перекрытия (статического и динамического);

режим трения по нагрузке, скорости скольжения, электрические и тепловые токи и их градиенты по поверхностям и по толщине элементов трения рассматриваемых по координатам и времени.

Из явлений, сопровождаемых электротермомеханическое трение, отметим два, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность металлополимерных пар трения:

– генерирование электрических и тепловых токов;

– изнашивание микровыступов металлополимерных пар трения.

Изнашивание микровыступов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении и его непосредственный результат – износ, который является неперенным следствием процесса трения и основной причиной выхода из строя самого слабого звена пары – фрикционной накладки.

Выводы. Таким образом, на основании исследований электрических и тепловых токов, генерируемых на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении с последующим определением температур вспышек позволили расширить и дополнить уровень понимания знаменитых триад И.В. Крагельского и А.В. Чичинадзе.

Список литературы

1. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Техника, 1980. – 394 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.
5. 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.56. – С. 55–70.
6. 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 износа: научн.-техн. ж. – К.: НАУ, 2013. – Вып. 2 (61). – С. 20–28.
7. Ленточно-колодочные тормозные устройства: [монография] / Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, Д.Ю. Журавлев [и др.]; Кубанск. государственн. технолог. ун-т и Прикарпатск. национальн. ун-та им. В. Стефаника, 2013. – 441 с.
8. Парфенов В.Н. Температурная задача трения в нагруженных многодисковых тормозах / В.Н. Парфенов, С.С. Коконин. – В сб.: Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. – М.: Наука, 1978. – С. 98 – 119.
9. Игнатъева Э.В. К вопросу оценки температуры поверхности при трении со значительным тепловыделением / Э.В. Игнатъева, М.А. Мамхедов. – В сб.: Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. – М.: Наука, 1978. – С. 84 – 91.

Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ

ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕННІСТЬ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ ПРИ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ

Енергонавантаженисть металополімерних пар при електротермомеханічному терті розглянуто с позицій енергетичних рівнів різних типів контактів мікроставупів, визначення часу контактнo-імпульсної взаємодії, а також практичної інтерпретації електричних та теплових струмів на плямах контактів.

Ключові слова: енергонавантаженисть, пари тертя, гальмівний пристрій, елементи тертя, електромеханічне тертя, поверхневий та приповерхневий шар, енергетичний рівень.

D. Y. ZHURAVLEV

THE POWER LOADING OF METAL-POLYMER PAIRS FRICTION AT FRICTION INTERACTION

The power loading of metal-polymer pairs at electrothermomechanical friction is considered from the standpoints of the energy levels of different types of microprojection contacts, time determination of contact-impact interaction and practical interpretation of electric and heat current on the contact spots.

Key words: power loading, friction pairs, braking device, friction elements, electrothermomechanical friction, surface and near-surface layers, energy level.

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри механіки машин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.