

УДК 621.891

С. И. КРИШТОПА

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина***ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНТАКТНО-ИМПУЛЬСНОМ
ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
И ТЕПЛОВОМ ПОЛЕ**

Рассматривается поведение материалов при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии в электрическом и тепловом поле с учетом волновой теории, действующей на пятна контактов микровыступов металлополимерных пар трения.

Ключевые слова: материалы и пары трения, контактно-импульсное взаимодействие, электрическое и тепловое поле, пятно контакта, микровыступ, геометрические и эксплуатационные параметры.

Введение. За последние десять лет в отечественной, ближнего и дальнего зарубежья появились публикации о едином поле взаимодействия для различных объектов исследований, одним из которых являются металлополимерные пары трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок. На микровыступах пятен контактов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении действуют динамические нагрузки, генерируются электрические и тепловые токи, происходят химические реакции и возникают электромагнитные волны в виде солитонов. Остановимся на общей концепции полей пятен контактов микровыступов.

Состояние проблемы. Вопросам исследование электрического и теплового импульса и тепловым напряжениям в энергонагруженных фрикционных узлах ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок уделяется все большее внимание. Сопротивление материалов, особенно фрикционных, электрическому и тепловому импульсу, подразумевается как их стойкость в условиях мгновенной генерации электрического и теплового тока на контактирующих поверхностях металлополимерных пар трения.

Износ и разрушение фрикционных материалов при трении обусловлен совместным действием механических, электрических, тепловых, химических и электромагнитных полей на поверхностные и приповерхностные слои материалов и их градиентов, которые вызывают различные изменения в материалах. Особенно себе проявляет температурный градиент во фрикционных материалах по их слоям, имеющим различные коэффициенты линейного расширения, что ведет к возникновению в них тепловых напряжений. Таким образом, проблема сопротивления тепловому импульсу и тепловым напряжениям, обусловлена действием не только тепловых полей, но и совокупности других полей сопровождающих первые.

На основании анализа многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1–6 и др.] установлена взаимосвязь процессов, явлений и эффектов, происходящих на макро-, микро- и наноуровнях при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии. Основным параметром на который необходимо обратить внимание является нормальная сила для определения удельных нагрузок на пятна контактов микровыступов, а также входящая в составляющие динамического коэффициента трения, тормозного момента. Перечисленные параметры существенно влияют на градиентную теорию единого поля взаимодействия.

Разработка обобщенной электротермомеханической теории трения и износа металлополимерных пар трения тормозных устройств позволит в дальнейшем осуществлять прогнозирование, регулирование и управление изменением их внутренних и внешних эксплуатационных параметров с целью повышения эффективности и ресурса фрикционных узлов.

Перейдем к рассмотрению поведения фрикционных материалов в силовом и скоростном поле взаимодействия микровыступов металлополимерных пар трения.

Поведение фрикционных материалов в силовом и скоростном поле. Если импульсные нормальные силы, действующие на пятна контактов микровыступов, создают поле равномерных удельных нагрузок, что обеспечит одинаковые поверхностные градиенты и равномерно распределенные электрические и тепловые токи. Наличие микровыступов взаимодействующих поверхностей различной высоты приводит к концентрации удельных нагрузок и, следовательно, к генерированию электрических и тепловых токов на отдельных участках поверхностей контакта, что способствует повышению локальных температур. Этот процесс назван Бертоном как «термоупругой неустойчивостью». При взаимодействии микровыступов продолжается, то поднятие их участков, где развиваются удельные нагрузки, другие участки будут понижаться вследствие износа, пока контакт не наступит всюду. При этом новые контактные участки начинают нагреваться, расширяться и воспринимать нагрузку; старые снижают нагрузку, охлаждаются. Масштаб нагретых участков велик по сравнению с масштабом поверхностных шероховатостей, и время описанного цикла велико по сравнению с временем взаимодействия шероховатостей.

Изменение геометрии волны в процессе термоупругой неустойчивости, а также закономерностей изменения ее износо-фрикционных свойств при контактно-импульсном взаимодействии приводит к следующему. Электротермомеханическое сопротивление дискретных контактов с различной энергетической активностью микро-конденсаторов и -термобатарей [6; 7] с мгновенным их переключением при изменении пятен контактов микровыступов и градиентов механических свойств, а также темпов проникновения взаимодействующих между собой импульсов электрического и теплового токов вызывает «разрушение» более нагретой границы волны и компенсируется процессом ее непрерывного восстановления при выпучивании материалов на менее нагретой границы волны. При этом проникновение импульсов электрического и теплового токов влияет на интенсивность износа площадок микровыступов при переполаризации, ведущей к дестабилизации динамического коэффициента трения.

На рис. 1 показаны закономерности изменения термоупругой неустойчивости пятен контактов металлополимерной пар трения при $V = f(p)$, где p – удельные нагрузки; V – скорость скольжения. Чтобы избежать переходных явлений одной из поверхностей представим в виде идеально гладкой и электротеплопроводящей. Неподвижные микровыступы полимерной накладки имеет коэффициент скольжения s и их поверхности содержат малую начальную волнистость амплитуды Δ с длиной волны λ .

Из рис. 1 следует, что начальная синусоидальная волнистость длины волны λ дает флуктуацию удельной нагрузки той же длины, выражаемые формулой [8].

$$p(x) = \bar{p} + p^* \cos(2\pi / \lambda) \quad (1)$$

Рассмотрение флуктационных компонентов удельных нагрузок и электрических и тепловых токов позволило оценить термическое искажение фрикционной поверхности накладки.

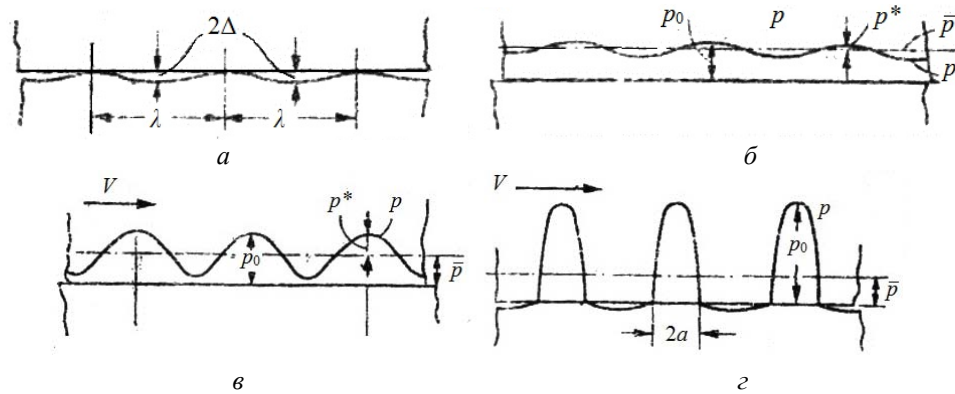


Рис. 1. Закономерности изменения термоупругой неустойчивости пятен контактов металлополимерной пар трения при $V = f(p)$: а – разгрузка; б, в, г – при нагружении, когда $V = 0$; $V \leq V_c$; $V_c > V$

Чтобы сжать волну до квазиплоской поверхности термические удельные нагрузки $p'(x)$ необходимо усилить изотермическими удельными нагрузками (рис. 1, б). В дальнейшем при увеличении скорости скольжения (V) до допустимой величины (V_c) флуктуация удельных нагрузок быстро возрастает по величине (рис. 1, в).

Когда флуктуация удельных нагрузок p^* достигает их средней величины $\bar{p}$ поверхности взаимодействия будут разделены на впадинах начальной волнистости, а пятно контакта будет сконцентрировано в гребнях (рис. 1, г). Предположим, что удельные нагрузки на контактных участках $-a \leq x \leq a$ герцевское, т.е.

$$p(x) = p_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad \text{где } p_0 = aE^*/2R; \quad E^* - \text{модуль Юнга фрикционных ма-}$$

териалов при p^* .

Кривизна ρ искаженной поверхности при $x = 0$ определяется из выражения

$$\rho = cfVp_0, \quad (2)$$

где f – динамический коэффициент трения.

Зависимость (2) справедлива когда начальная волнистость мала по сравнению с последующим термическим искажением.

Таким образом, из зависимости (2) следует что

$$a = 2/(cfVE^*). \quad (3)$$

Непрерывный контакт переходит в прерывистый в том случае когда $V \rightarrow V_c$, что позволяет после ряда преобразований определить допустимый размер области контакта

$$a_c = \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Неравномерное распределение удельных нагрузок на пятнах контактов непосредственно приведет к неравномерному распределению электрических и тепловых токов, и как следствие, к неравномерному распределению поверхностных температур. При скоростях скольжения меньше допустимых, когда микроконтакты находятся в непрерывном взаимодействии, колебания удельных нагрузок синусоидальные с амплитудой p^* (см. рис. 1, б). Отсюда следует, что колебания электрических и тепловых токов также синусоидальные, что подтверждает их волновую природу [6].

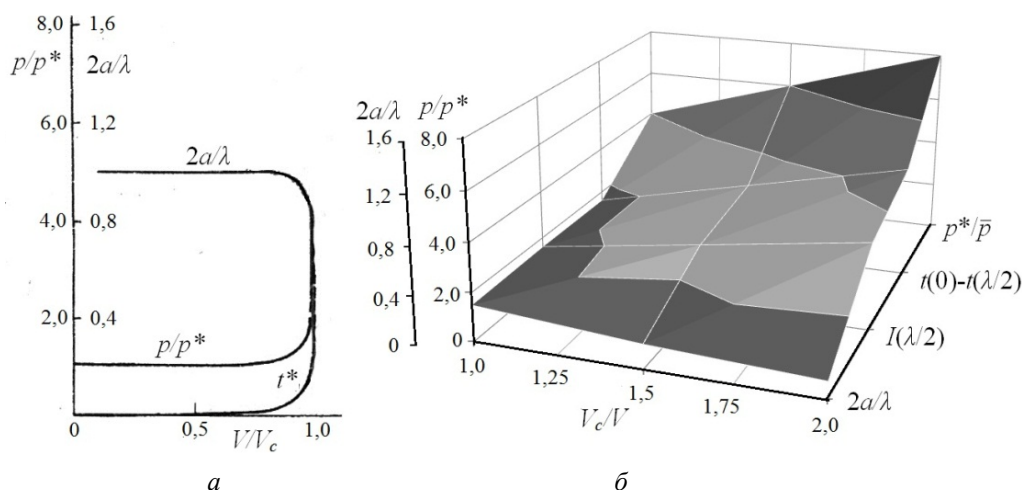


Рис. 2. Закономерности изменения соотношений удельных нагрузок ($p^*/\bar{p}$) и характеристик пятна контакта ($2a/\lambda$) (а), а также флуктуаций электрического (I) и тепловых (t) токов (б) в зависимости от соотношений скоростей скольжения (V/V_c) и (V_c/V)

На основании графических зависимостей, приведенных на рис. 1, а также построенных зависимостей, по методике предложенной К. Джонсоном (см. рис. 2) проанализируем закономерности изменения удельных нагрузок на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения. При статическом контакте любая волнистость контактирующих пятен приводит к неравномерному распределению удельных нагрузок. При низких скоростях скольжения отклонения удельных нагрузок от усредненной величины увеличивается из-за термоупругого искажения. Когда скорость достигает допустимой величины (V_c) амплитуда колебаний возрастает очень быстро, и если этого ранее уже не произошло, то поверхности взаимодействия разделяются в местах начальных впадин. Контакты становятся прерывистыми, а размер участков контактов доходит примерно до $1/3$ начальной длины волны. Дальнейшее возрастание скорости приводит к уменьшению размера участка контакта. Внезапное повышение удельных нагрузок при уменьшении площади контакта при допустимой скорости скольжения сопровождается резким увеличением флуктуаций электрических и тепловых токов.

Наличие коротковолновых и длинноволновых отклонений по разному влияет на неустойчивость процессов и на общие величины генерируемых электрических и тепловых токов на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении. Указанные реальные поверхности обладают целым спектром начальных отклонений. Установлено, что изменение удельных нагрузок возрастает пропорционально отношению Δ/λ (см. рис. 1, а), т.е. наклону поверхностных несовершенств. При этом допустимая скорость скольжения не зависит от амплитуды волны и обратно пропорциональна ее длине. Конструктивные параметры микровыступов металлополимерных пар трения (диаметр рабочих поверхностей металлических и неметаллических фрикционных элементов и их ширины) имеют двухмерные отклонения реальных поверхностей.

Конструктивные параметры металлополимерных пар трения накладывают ограничения на верхний предел для длины волны микронеровностей и, следовательно, на нижний предел для допустимой скорости. Из всего вышеизложенного вытекает, что длинноволновые отклонения становятся неустойчивыми раньше,

чем коротковолновые, что объясняется существенным различием в энергетических уровнях поверхностных слоев микровыступов. Наличие коротковолновых отклонений с гребнями позволяет генерировать значительное количество электрических и тепловых токов, и таким образом достигать устойчивость сопровождающих явлений, процессов и эффектов при электротермомеханическом трении.

Термоупругое поведение фрикционных материалов. Процесс ползучести материалов при электротермомеханическом трении (при высоких температурах), который сопровождается непрерывным разрушением контурных площадок микровыступов является не единственным явлением, связанное с реологическими свойствами их материалов.

Другим существенным явлением, определяющим формирование макрогеометрии на основании микрогеометрии каждого микровыступа, - термоупругое поведение фрикционных материалов. При нагревании электротепловыми токами до высоких поверхностных температур (1000 °C и выше) металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза материалы их поверхностей выпучиваются и образуют термоупругую волну микронеровности, продольная ось которой совпадает с вектором скорости относительного движения тормозного шкива.

Мгновенное протекание процессов, явлений и эффектов способствует сохранению равновесного состояния геометрии волны благодаря термоупругим свойствам материалов, а электротермомеханическое трение происходит на движущейся волне вместо разрушающихся материалов на более нагретой границе волны вступают в контакт материалы на менее нагретой границе контурной площадки; как результат указанных процессов наблюдается динамическое равновесие геометрии волны, а также электротепловых полей в зоне трения на контурной площадке в каждый донный момент времени.

Эффект, обеспечивающий динамическое равновесие электротеплового поля, заключается в следующем. Равновесие процессов наблюдается при условии когда $V_n = V_s$ (где V_n, V_s – скорости: ползучести; выпучивания). При устойчивой асимметрии электротеплового поля на поверхности волны и ее стабильной геометрии наблюдаемая скорость перемещения волны будет равна $V_r = (V_n)_r = (V_s)_r$. На поверхности волны генерируется электротермоимпульс – от более высоких значений впереди движущейся волны до равновесных («низких») за волной. Напряжения, возникающие в термоупругой волне, – это напряжения от действия импульсной нормальной и тангенциальной нагрузок, а также электротепловых напряжений. Последние намного превосходят первые и определяют при $\sigma_c \geq \sigma_{с\text{кр}}$ процессы ползучести. Импульсные нормальные нагрузки определяют величину (ширину) контурной площадки. Равновесие скоростей V_n и V_s соблюдается в результате термоупругой деформации материалов, обеспечивающих необходимую несущую способность волны. Равновесное состояние геометрии волны определяется термоупругими свойствами материалов. При этом вступать в контакт приповерхностные слои материалов волны будут на менее нагретой границы. В результате волна перемещается от более нагретых участков материалов к менее нагретым.

Электрофизические параметры боковых поверхностей микровыступов металлополимерных пар трения тормозных устройств обладают выпрямляющими свойствами в поле «металл-полупроводник». При этом сами пятна контактов имеют при электротермомеханическом трении электрические поля, которые характеризуются токами периферийных эффектов [4], зависящие от длины боковых поверхностей микровыступов и их площадей. Явление токов периферийных эффектов

объясняется тем, что разность электротермомеханического потенциала на пятне контакта металлополимерной пары трения намного меньше, нежели по его длине.

Динамическое равновесие между скоростями ползучести и восстановления макроволны обусловлено тем, что для ползучести материалов на контурных площадках при электротермомеханическом трении характерна стабильность по температурным градиентам, геометрии макроволны и связанными с ними термическими напряжениями. Стабильность электротеплового поля для контурных площадок микровыступов металлополимерных пар трения наблюдаемых «в среднем» с точностью до случайных отклонений температурных градиентов от равновесных значений, причем отклонения связаны с влиянием реальных структур взаимодействующих зон поверхностей, способствующих формированию пленочных микротермоэлектробатарей, работающих в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников [6]. Количественное соотношение последних и определяет квазистабильность температурных градиентов на контурных площадках микровыступов.

В качестве электротепловой модели, перемещающейся контурной площадки можно выбрать движущейся по номинальной поверхности микровыступов со скоростью V_r электротепловые источники, конкретно, в качестве простейшей модели – движущейся линейный электротепловой источник.

Согласно [9] уравнение, связывающие скорость перемещения волны с величиной средней температуры на волне (модель линейного источника), имеет вид

$$\Delta t_c = t_c - t_0 = \frac{q'_c}{2\pi\lambda} e^{-\frac{V_r}{2a} R^2} K_0 \left(\frac{V_r \sqrt{R^2 + \delta_{nl}^{*2}}}{2a} \right), \quad (4)$$

где q'_c – тепловой поток на контурной площадке; λ , a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала, определяющие движение волны; K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка; δ_{nl}^* – толщина деформируемого материала на поверхности трения; R – координата точки на поверхности трения, отсчитываемая от теплового источника.

Между температурой нагрева и скоростью ползучести материалов устанавливается равновесие в соответствии с закономерностью (4). При повышении температуры за счет генерируемых электрических токов с ухудшением электротермомеханического трения на контурной площадке, происходит увеличение скорости ползучести и скорости выпучивания недеформированных материалов. Последнее в значительной степени зависит от коэффициентов линейного расширения ниже находящихся слоев материалов, а также их теплопроводности. При этом для прогрева материалов до температуры $t_c = (t_e)_n$ требуется определенное время, тем больше, чем ниже температура площадок на которые смещается номинальные поверхности от перегретого пятна импульсными электрическими и тепловыми токами. В результате данный процесс способствует увеличению скорости ползучести, а зависимость от нее скорость движения уменьшается.

На основании зависимости (4), используя допущения, связанные с реальной структурой площадок пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения, уравнение для скорости перемещения волны имеет вид

$$V_r = C_c \exp(-2\pi\lambda\Delta t_c / q_c), \quad (5)$$

где $C_c = 4a / C' \delta_{nl}^*$ – характеризует геометрию волны; $C_c = 1,78$ – постоянная Эйлера.

Скорость V_r зависит только от энергетических параметров мгновенного состояния материалов и от равновесных электрических и тепловых токов на волне. Соотношение пригодно для оценки скорости движения волны как при стационарном, так и нестационарном режимах электротермомеханического трения. При нестационарном трении, когда $\Delta t_c/q_c = \text{const}$, а также и $V_r = \text{const}$. При этом, как следует из (4) и $t = \text{const}$.

Стабильность динамических нагрузок и электротеплового поля на волне приводит к тому, что стабилизируется и поле термических напряжений. При значительном же снижении электрических и тепловых токов на волне скорость ползучести, как следует из (5), резко падает. Процесс ползучести реализуется тогда и до тех пор, пока слой материалов, прогретый до температуры $t \geq t_0$, превышает некоторую его предельную величину $\delta \geq \delta_0^*$. В противном случае процесс «тормозится». Поскольку при уменьшении электрических и тепловых токов к концу электротермомеханического трения условие $\delta \leq \delta_0^*$ и $t \leq t_0$ достигается в некоторый момент времени, «торможение» процесса ползучести, протекающего с конечной (примерно постоянной) скоростью происходит внезапно.

Рассмотренные закономерности отличаются не только статической, но и динамической устойчивостью. При это реальные структуры материалов пятен контактов микровыступов – пленки, трещины, физические неоднородности, дефекты геометрии и другие изъяны – оказывают существенное влияние на закономерности электротермомеханических процессов трения. Основное влияние дефектов структуры материалов и геометрии микровыступов сводится к тому, что процессы ползучести на пятнах контактов становятся неравновесными, а вектор скорости ползучести описывается случайной функцией.

Выводы. Таким образом, проиллюстрировано поведение металлополимерных материалов, пятен контактов их микровыступов при электротермомеханическом трении, находящихся под воздействием силового и скоростного поля, вызывающие термоупругое состояние фрикционных материалов.

Список литературы

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
2. Лурье С. Прогноз механических и динамических свойств материалов с микро- и нано-структурной на основе градиентной теории сред / С. Лурье // Электронный журнал: Труды ИПРИМ РАН. – М., 2009. – 46с.
3. Журавлев Д.Ю. Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения / Д.Ю. Журавлев // Проблемы трения и изнашивания: научн.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. Вып. 60 – С. 35–41.
4. Мамедов Р.К. Контакты металл-полупроводник с электрическим полем пятен / Р.К. Мамедов. – Баку: Госуниверситет, 2003. – 231с.
5. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун и др. – М.: Наука, 1986. – 245с.
6. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография / Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, [и др.]. – Кубанск. государств. технолог. ун-т. – Краснодар, Ивано-Франковск, 2013. – 441с.
7. Фрикционные узлы / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, П.Ю. Пургал, Д.А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510с.

9. 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, 1979. – С. 98–119.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2013

С. І. КРИШТОПА

ПОВЕДІНКА МАТЕРІАЛІВ ПРИ КОНТАКТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ І ТЕПЛОВОМУ ПОЛІ

Розглядається поведінка матеріалів при контактній-імпульсній фрикційній взаємодії в електричному та тепловому полі з урахуванням хвильової теорії, діючої на плями контактів мікрорівнів металополімерних пар тертя.

Ключові слова: матеріали та пари тертя, контактній-імпульсна взаємодія, електричне та теплове поле, пляма контакту, мікрорівень, геометричні та експлуатаційні параметри.

S. I. KRYSHTOPA

BEHAVIOR OF MATERIALS AT THE CONTACT-IMPULSE FRICTION INTERACTION IN ELECTRIC AND THERMAL FIELD

We've shown the behavior of materials in contact-impulse frictional interaction in electric and thermal field with the wave theory of acting on the contact patch of microprojections of metal-polymer friction pairs.

Keywords: materials and friction pairs, contact-impulse interaction, electric and thermal field, the contact patch, microprojection, geometric and performance parameters.

Криштопа Святослав Ігорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри нафтогазового технологічного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу