

УДК 62-92.113

Н.А. Вольченко, доцент, канд. техн. наук,**С.И. Криштопа, доцент, канд. техн. наук,****А.В. Возный, аспирант***Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019***ГРАДИЕНТ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ
ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ**

Показано определение допустимых градиентов электрического потенциала и перепада температуры в металлополимерных парах трения при торможении на основании контактно-импульсного взаимодействия микровыступов их поверхностей.

Ключевые слова: контактно-импульсное взаимодействие микровыступов; пары трения; градиенты: электрического потенциала и температуры; тормозные устройства.

Введение. Контактно-импульсное взаимодействие микровыступов поверхностей металлополимерных пар трения тормозных устройств на первой стадии торможения способствует реализации трибоэффекта в результате которого генерируется электрический ток. В дальнейшем в приповерхностных слоях аккумулируется тепловая энергия. Однако в работе [1] показано, что на процессы нейтрализации зарядов при контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения оказывает влияние свойства контактов (нейтральные, омические и заблокированные). Нейтральные контакты не препятствуют нейтрализации зарядов, поступающих из приповерхностного слоя металлического элемента трения в течение термостимулированного разряда. То же можно сказать и об омических контактах, хотя в этом случае добавляется возможность инъекции носителей противоположного знака внутрь заряженной поверхности накладки. Блокирующие контакты действуют противоположным образом: они препятствуют как инъекции, 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. Однако, в данной работе не было уделено внимание градиентной теории электротепловых полей металлополимерных пар трения тормозных устройств.

Состояние проблемы. В последнее время в отечественной и мировой научно-технической литературе указывается, что наука развивается по следующим направлениям градиентной теории: электрической, магнитной, тепловой и среды, в которой происходят перечисленной природы явления, процессы и эффекты. Наибольший интерес проявляют исследователи к градиентам электротепловых полей металлополимерных пар трения тормозных устройств.

Цель работы. Оценить контактно-импульсное взаимодействие микровыступов пар трения тормозов различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях.

Определение допустимых градиентов электрического потенциала и перепада температуры в металлополимерных парах трения при торможении. Градиентная теория твердых тел и на границах межфазных слоев в интервале поверхностных температур ниже и выше допустимой для материала полимерной накладки позволит дать ответ на вопрос обеспечения положительного градиента механических свойств в поверхностных слоях металлополимерных пар трения тормозных устройств. Однако при этом существенное влияние оказывают градиенты электрического потенциала и температуры на взаимодействующих поверхностях пятен контактов микровыступов пар трения «полимер-металл» и по их глубине.

В таблице 1 представлено шесть случаев контактно-импульсного взаимодействия микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при

заданных граничных условиях. В таблице 1 использованы следующие обозначения: $\frac{d\varphi}{dn}$, $\frac{d\vartheta}{dn}$ - градиенты электрического потенциала и температуры; a – радиус пятна контакта; r – расстояние от пятна контакта; s – воздушный зазор между пятнами контактов; A_0 , A_1 , A_2 – площади пятен контактов: рассматриваемая и изотермические; q – общий пространственный заряд; u – общее напряжение стягивания; θ , T и T_0 – температуры: разность на пятне контакта; большая металла и окружающей среды; Π_1 – теплота Пельтье; WX , WY – тепловые сопротивления частей потоков, отнесенные к осям координат

X и Y; χ , k – коэффициенты электро- и теплопроводности контактирующих материалов; kВ, kЗ – коэффициенты теплопроводности материала полимерной накладки и воздушного зазора между контактами; σ_i , γ – коэффициенты: Томпсона; пропорциональности; j – плотность электрического тока; ρ – удельное электрическое сопротивление контакта.

Таблица 1 – Контактно-импульсное взаимодействие микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях

№ п/п	Случаи взаимодействия пятен контакта	Зависимости для оценки электрических и тепловых полей
1.	Положение электрического поля на пятне контакта: асимметричное;	$\frac{d\varphi}{dn}$ уменьшается как $1/r^2$; каждый q влияет как q/r; не нарушается зависимость вида $\varphi - \vartheta$.
2.	симметричное с проводимостями, которые отличаются существенно (пара «полимер-металл»)	$(d\varphi/dn)_{\vartheta} = 0, \quad (d\vartheta/dn)_{\vartheta} = 0; \quad \int_{\vartheta}^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,5\varphi^2. \quad (1)$ $W_X = 0,125ak_B; \quad (2) \quad W_Y = \frac{S}{1,7a^2k_S} + \frac{1}{2\pi ak_B}. \quad (3)$
3.	незначительно (пары: «металл-металл»; «полимер-полимер»).	$\left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_{\vartheta} = 0; \quad \left(\frac{d\vartheta}{dn}\right)_{\vartheta} = 0. \quad \int_{\vartheta}^{\theta} \frac{k}{\chi} d\vartheta = 0,5\varphi^2; \quad (4)$ $\int_0^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,125u^2. \quad (5)$
4.	Биметаллические пятна контакта	$\int_{\vartheta}^{\theta} \frac{k}{\chi} d\vartheta = 0,5\varphi^2; \quad (6) \quad (grad\varphi)_{A_1}$ отличается от $(grad\varphi)_{A_2}$
5.	Взаимодействие электрических и тепловых потоков: одинаковой плотности на пятне контакта;	$\left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_{\vartheta} = 0; \quad \left(\frac{d\vartheta}{dn}\right)_{\vartheta} = 0. \quad \left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_{A_0} \neq 0 \quad (7) \quad (d\theta/d\varphi)_{A_0} = 0$ заменяется эквивалентным условием $\frac{k}{\chi} \left(\frac{d\vartheta}{d\varphi}\right)_{A_0} = Y.$ $\frac{k}{\chi} \frac{d\vartheta}{d\varphi} = -\varphi; \quad \int_{\vartheta}^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,5\varphi^2 + Y\varphi. \quad (8)$ $\int_{\vartheta}^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,5u^2 + \Pi_1 u. \quad (9)$
6.	при переносе теплоносителями электрического тока с температурным градиентом	$Q = I\sigma_i d\vartheta; \quad (10) \quad d\left(\frac{k}{\chi} \frac{d\theta}{d\varphi}\right) = -d\varphi; \quad \left(\frac{d\vartheta}{d\varphi}\right)_{A_0} = 0;$ $\frac{k}{\chi} \frac{d\theta}{d\varphi} = -\varphi; \quad (11)$ $\int_{\vartheta}^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,5\varphi^2 - \int_0^{\varphi} d\varphi \int_{\vartheta}^{\theta} \sigma_i d\vartheta. \quad (12) \quad \sigma_i = \gamma T; \quad (13)$ $\int_{\vartheta}^{\theta} \rho k d\vartheta = 0,5\varphi \left\{ \varphi - \gamma \left[(T_0 + \theta)^2 - T_0^2 \right] \right\}. \quad (14)$

Кратко проанализируем каждый из случаев, представленных в таблице 1.

Первый случай. Асимметрия наблюдается в отдельных зонах там, где расстояние r от контакта велико по сравнению с радиусом a контактного пятна микровыступов АС, которое в данном случае имеет форму круга (рисунок 1).

Установлено, что градиент потенциала в зоне стягивания уменьшается по мере увеличения расстояния от контакта, примерно как 1/r2. При этом общий пространственный заряд в отдельных зонах стягивания по величине почти такой же, как и заряды в непосредственной близости от пятна контакта (см. рисунок 2 а, б). Следовательно, влияние удельных зарядов на электрическое поле в зоне стягивания пренебрежимо мало.

Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении теплового поля.

Таким образом, асимметрия не нарушает закона зависимости вида $\varphi - \vartheta$ в наиболее узких частях стягивания, так как градиенты температуры и напряжения в них велики, а асимметрия в отдельных зонах не отражается на общем напряжении стягивания u и на разности температур θ контактной поверхности пятна взаимодействия.

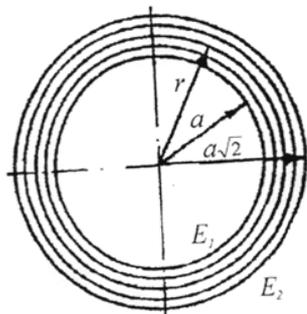


Рисунок 1 – Составляющие промежуточного пространства вокруг контактного пятна, имеющего радиус a

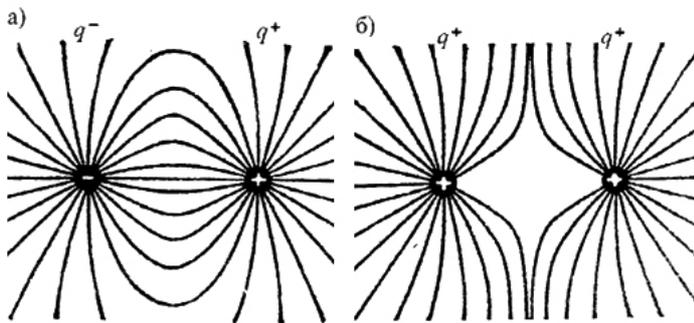


Рисунок 2 – Линии электрического поля: а - между разноименными зарядами; б - между одноименными (б) зарядами

Второй случай характерен для металлополимерных пар трения. При нагревании микровыступов поверхности контакта условия $(d\varphi/dn)_z = 0$ и $(d\vartheta/dn)_z = 0$ не соблюдаются, поскольку имеется разность температур между взаимодействующими пятнами контактов. При этом тепловой поток делится на две части: продольную (часть X) и поперечную (часть Y). Тепловой поток вдоль Y вызовет отклонение результатов расчета по зависимости (1) (см. таблицу 1) примерно на величину $(W_X/W_Y)100, \%$. Составляющие уравнения (1) определяются по зависимостям (2) и (3). После выполненных расчетов на основе значений параметров получили величину отклонения теплового потока $W_X/W_Y < 0,05$, которой можно пренебречь.

Третий случай характерен для интенсивного массопереноса от микровыступов контактирующих поверхностей по схеме «полимер-металл» и наоборот. Он определяет энергетические уровни взаимодействия микровыступов пятен контактов согласно зависимостям (4) и (5).

Четвертый случай отличается от третьего градиентами $[(grad\varphi)_{A1}]$ отличается от $(grad\varphi)_{A2}]$, так как энергетические уровни металлов, входящих в биметалл, различны.

Пятый случай. Поверхность пятна контакта микровыступов A_0 удовлетворяет граничным условиям, но не удовлетворяет условию $(d\varphi/dn)_{A_0} \neq 0$, так как A_0 пересекается тепловым потоком, плотность которого пропорциональна плотности электрического тока j . Вследствие этого получаем Yj , где Y имеет единицу измерения напряжения.

Поскольку тепловой поток пропорционален j , он не вносит изменений в систему элементарных линий тока.

В результате преобразований ряда зависимостей получили выражение (6) для оценки теплового потока в интервале температур $0 - \vartheta$ и при изменении температур от ϑ до θ [выражение (8)]. Часть теплоты Пельтье (Π_1) уходит в исследуемое пятно контакта и составляет тепловой поток $\Pi_1 j$, а U является напряжением зоны стягивания на нем.

Анализ зависимости (8) показывает, что при небольших величинах U , характерных для металлополимерных пар трения, эффект Пельтье вызывает заметное отклонение U от зависимости вида $\varphi - \vartheta$.

Шестой случай характеризуется переносом теплоносителями электрического тока из более нагретой зоны в менее нагретую зону пятна контакта, лежащую на пути его движения. Это осуществляется посредством эффекта Томпсона, интенсивность которого зависит от коэффициента Томпсона (σ_T). Записав количество теплоты (9), поступающей от сечения с температурой $\vartheta + d\vartheta$ к соседнему сечению с температурой ϑ с учетом граничных условий, и используя зависимость вида (10), после окончательного интегрирования получили выражение (11).

В дальнейшем применив условие, что при больших температурах металлического элемента трения σ_T пропорционален T (13) в окончательном виде получаем зависимость (14). Последняя связывает между собой параметры электрического и теплового полей, токи которых пронизывают пятна контакта микровыступов трущихся поверхностей.

В кратковременных торможениях при отсутствии теплоотдачи от матовых поверхностей шкива происходит интенсивное аккумулялирование теплоты, которое может привести его к предельному тепловому состоянию. Для упрощенного рассмотрения задачи теплопроводности пренебрегаем теплоотдачей в окружающую среду [2, 3].

К вопросу уточнения термостабилизационного состояния металлического фрикционного элемента тормозных устройств. В работе [4] было исследовано термостабилизационное состояние металлического фрикционного элемента (обода шкива или барабана), исходя из условий его возникновения и предотвращения. При этом рассматривалось метастабильное состояние поверхности фрикционных накладок, находящихся при температуре выше допустимой для их материалов, а также тепловое взаимодействие металлического фрикционного элемента из подкрепляющим выступом или фланцем. При этом не учитывалось условие теплового равновесия требуют, как известно, наряду с постоянством температуры также и постоянства вдоль среды суммы $\mu+U$, где μ – химический потенциал частиц, а U – их энергии во внешнем электрическом поле. В данном случае речь идет о равновесии по отношению к электронам, так что под μ надо понимать их химический потенциал, а $U = -e\phi$, где ϕ – потенциал электрического поля. Соответственно, этому электрический ток j_1 и диссипативный поток энергии q обращаются одновременно в нуль лишь при условиях $\vartheta_1 = \text{const}$, $\mu - e\phi = \text{const}$, т.е. при $\nabla \vartheta_1 = 0$, $\nabla \mu + eE = 0$. Выражение для j_1 и q записывают в виде следующих соотношений, удовлетворяющих указанному условию

$$E + \frac{1}{e} \nabla \mu = \frac{1}{\sigma} j_1 + \alpha \nabla \vartheta_1, \quad (15)$$

$$q = q - \left(\phi - \frac{\mu}{e}\right) j_1 = \alpha \vartheta j_1 - \chi \nabla \vartheta_1, \quad (16)$$

где σ – электрическая проводимость среды; χ – коэффициент теплопроводности; α – термоэлектрический коэффициент; соотношение между коэффициентами $\nabla \vartheta_1$ в (15) и j_1 в (16) – следствие принципа Онсагера [5]. Величина $(\phi - \mu/e)j_1$, вычтенная из полного потока энергии, представляет собой плотность конвективного потока энергии. Последнюю и необходимо учитывать при оценке термостабилизационного состояния металлического фрикционного элемента в тормозных устройствах.

Выводы. Таким образом, проиллюстрировано определение допустимых градиентов электрического потенциала и перепада температуры в металлополимерных парах трения при контактно-импульсном взаимодействии микровыступов их поверхностей. Предложен материал относится как к барабанно-колодочным так и к ленточно-колодочным тормозным устройствам.

Библиографический список использованной литературы

1. Сесслер С. Электреты – С. Сесслер. – М.: Мир, 1983. – 481с.
2. Джанахмедов А.Х. Триботехнические проблемы в нефтегазовом оборудовании / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 1998. – 216с.
3. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560с.
4. Вольченко Д.А. Температурный анализ тормозных шкивов буровых лебедок / Д.А. Вольченко, М.М. Стебелецкий // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – Ивано-Франковск. – 2006. - №4(21). – С. 27-34. – На укр. яз.
5. Лифшиц Е.М. Физическая кинетика / Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М.: Наука, 1979. – 527с.

Поступила в редакцию 13.05.2013 г.

Вольченко М.О., Криштопа С.І., Возний А.В. Градієнт електротеплових полів металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв

Показано визначення допустимих градієнтів електричного потенціалу і перепаду температури в металополімерних парах тертя при гальмуванні на основі контактно-імпульсної взаємодії микровиступів їх поверхонь.

Ключові слова: контактно-імпульсна взаємодія микровиступів; пари тертя; градієнти: електричного потенціалу і температури; гальмівні пристрої.

Volchenko N.O., Kryshchopa S.I., Vozniy A.V. Gradient of electro-thermal fields of metal-polymer friction pairs of braking devices

We've displayed the determine allowable gradient of electric potential and the temperature drop in the metal-polymer friction pairs during braking based on contact-pulse of micro-ledges interaction their surfaces.

Keywords: contact-pulse interaction of micro-ledges; friction pairs; gradients of: electric potential and temperature; braking devices.