

УДК 62-92.113

Д.А. Вольченко, доцент, д-р техн. наук,

В.Я. Малык, доцент, канд. техн. наук

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019*

В.В. Карась, старший преподаватель

Бережанский агротехнический институт

ул. Академическая, 20, г. Бережаны, Тернопольская обл., Украина, 47501

ТЕМПЫ ПРОТЕКАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ТОКОВ В МИКРОВЫСТУПАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Раскрыта сущность темпов протекания импульсов электротепловых токов в микровыступах поверхностей трения тормозных устройств и приведены их расчетные зависимости.

Ключевые слова: импульс, электрический ток, тепловой ток, микровыступы, поверхности трения, пары трения, фрикционный узел, тормозное устройство.

Введение. Усовершенствование узлов трения сопряжено с существенным изменением динамики электрических и тепловых токов, циркулирующих в поверхностных слоях металлополимерных пар трения.

В соответствии с термодинамикой необратимых процессов, происходящих в приповерхностных и поверхностных слоях металлополимерных пар трения, неравномерное температурное поле приводит к возникновению деформаций и напряжений. В свою очередь, процесс деформирования вызывает изменение температурного поля. Как уже указывалось ранее, температурные напряжения могут возникать вследствие анизотропии свойств поверхностных слоев элементов трения металлополимерных пар, а также резкого различия теплофизических и механических характеристик структурных составляющих их слоев (коэффициента линейного расширения, теплопроводности, модуля упругости) [1].

Следует отметить, что проблема термической прочности включает в себя не только все сложности, присущие механическому нагружению (пластическое деформирование, ползучесть, релаксация, малоцикловая усталость, критерии разрушения и т.д.), но и сложности, связанные со спецификой воздействия температур.

При термическом нагружении пластическая деформация микровыступов полимерных накладок, как правило, концентрируется в наиболее нагретых зонах поверхности трения, причем процесс деформирования усугубляется тем, что в этой зоне падает предел текучести фрикционного материала, что существенно влияет на его износо-фрикционные свойства [2].

Состояние проблемы. При комплексном электротермомеханическом нагружении поверхностных слоев металлополимерных пар трения усталостные температурные и механические характеристики их материалов не совпадают. Это значит, что хотя математически процессы механо-термического и электротермического воздействия описываются одноподобными соотношениями, использовать результаты по механической прочности и усталости для оценки электрического и теплового нагружения и наоборот следует очень осторожно. Это вызвано тем, что при контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар темпы протекания процессов будут различными, так как они зависят от энергетических уровней их поверхностных слоев.

Цель работы. Оценка темпов протекания импульсов электротепловых токов в микровыступах поверхностей трения тормозных устройств. Основным условием взаимодействия токов является их взаимосвязь.

Взаимосвязь генерируемых токов и аккумулируемой теплоты в металлополимерных парах трения. Работа выхода электронов из поверхности трения металлического фрикционного элемента влияет на величину и направление термотоков, которые генерируются на рабочих поверхностях пар трения тормозных устройств.

Метод определения работы выхода электронов базируется на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, покидающий рабочую поверхность металлического элемента трения, выносит с собой энергию, доля которой составляет работу W его выхода. При нагревании металлического элемента трения при торможении до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, вблизи его рабочей поверхности образуется так называемая электронная туча (пространственный заряд). В случае разомкнутой пары трения тормоза устанавливается равенство числа электронов, покидающих рабочую поверхность металлического элемента трения из области пространственного заряда и возвращающихся в нее [3, 4]. При замыкании пар трения тормоза (предварительно нагретых) возникает движение электронов от рабочей поверхности металлического к неметаллическому (полимерному) фрикционному

елементу. В результате этого происходит снижение температуры рабочей поверхности металлического элемента трения, связанное выносом энергии каждым электроном.

Известно, что зависимость плотности тока от абсолютной температуры для металлического элемента трения описывается зависимостью Ричардсона-Дэшмана [5]:

$$j = CT^2 e^{\frac{W}{kT}}, \quad (1)$$

где C – постоянная, термодинамически одинаковая для всех металлов; T – температура рабочей поверхности металлического элемента трения; k – постоянная Больцмана; W – работа выхода электрона из поверхности металлического элемента трения.

Представив зависимость Ричардсона-Дэшмана в виде $j/T^2 = Ce^{\frac{W}{kT}}$, после логарифмирования получаем:

$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln C - \frac{W}{kT} \ln e.$$

Полученное равенство представим для двух тепловых состояний металлического элемента трения: до (T_1) и после (T_2) процесса торможения. При этом учитываем, что $\ln e = 1$ и $j = \frac{I}{A}$ (где I – ток, который генерируется в паре трения на микроучастке площадью A), в результате имеем следующие зависимости:

$$\ln \frac{I_1}{AT^2} = \ln C - \frac{W}{kT_1}; \quad (2)$$

$$\ln \frac{I_2}{AT^2} = \ln C - \frac{W}{kT_2}. \quad (3)$$

Разность между зависимостями (3) и (2) позволила получить:

$$\ln \frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2} = \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

В конечном итоге получили расчетную зависимость для определения работы выхода электрона из металлического элемента трения:

$$W = k \frac{\ln \frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение работы выхода электронов (4) устанавливает связь между токами, генерируемыми на рабочих поверхностях пар трения тормоза, и поверхностными температурами, обусловленными этими токами.

Примеры определения работы выхода электронов из металлического элемента трения в паре «металл-полимер» для различных температурных режимов полимера приведены ниже.

Первый режим: поверхностная температура полимера ниже допустимой. По зависимости (4) определяем работу выхода электрона из металлического элемента трения при следующих исходных данных:

$$I_1 = 0,1 \text{ нА}; I_2 = 26,9 \text{ нА}; T_1 = 393 \text{ К}; T_2 = 410 \text{ К}; k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}.$$

Подставив численные значения, получили:

$$W_M = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\ln \left(\frac{26,9 \cdot 393^2}{0,1 \cdot 410^2} \right)}{\frac{1}{393} - \frac{1}{410}} = 4,5 \text{ эВ}.$$

Второй случай: поверхностная температура полимера выше допустимой. Работа выхода электрона из металлического элемента трения определяется при условии $I_1 > I_2$ по зависимости вида:

$$W_{II} = K \frac{\ln\left(\frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \tag{5}$$

где I_1, I_2 – токи, которые порождают температуры T_1 и T_2 на поверхности трения в начале и в конце процесса торможения при условии, что фрикционный материал накладки достиг поверхностной температуры T_1 , выше допустимой в конце процесса торможения, нА; T_2 – температура металлического элемента трения в начале процесса торможения, К.

Расчет производился при следующих исходных данных:

$I_1=1,0$ нА; $I_2=61,6$ нА; $T_2=533$ К; $T_1=513$ К; $K=8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

$$W_M = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\ln\left(\frac{61,6 \cdot 533^2}{1,0 \cdot 513^2}\right)}{\frac{1}{513} - \frac{1}{533}} = 5,0 \text{ эВ}.$$

Рассмотрим контактное явление для пары трения «металл-полимер», элементы трения разделены тонким вакуумным зазором, температура полимера ниже допустимой (рисунок 1, а). Контактная разность потенциалов (ϕ) определяется как разность между электрическим потенциалом (уровнем Ферми) E_F металла (М2) и полимерного материала (П1). На рисунке 1, а поверхностный потенциальный барьер показан пунктирной линией, а уровни Ферми пары «металл-полимер» - сплошными горизонтальными линиями. Представленная схема отвечает начальному моменту, когда металл и полимер расположены на расстоянии d_0 , при котором возможен эффективный обмен электронами и ионами.

Согласно рисунку 1, а при условии $\phi_2 > \phi_1, j_2 > j_1$, перенос электронов будет происходить слева направо. При этом поверхность металла заряжается отрицательно, полимера – положительно. В зазоре возникает внешнее электрическое поле $E_K^{(en)}$ и соответствующая разность потенциалов $U_K^{(en)}$. В этом случае условием равновесия является равенство уровней Ферми. При этом токи выравниваются, т.е. $j_1 = j_2$ (см. рисунок 1, б). Данное равенство означает, что потенциальный барьер для электронов, которые движутся слева направо, т.е. $\phi_2 + eU_K^{(en)}$, должны быть равным потенциальному барьеру для ионов, которые движутся справа налево, т.е. ϕ_1 . Другими словами, справедливо равенство:

$$\phi_2 + eU_K^{(en)} = \phi_1. \tag{6}$$

Таким образом, после установления равновесия возникает контактная разность потенциалов:

$$U_K^{(en)} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{e}, \tag{7}$$

Более сложным является случай, когда в паре трения «металл-полимер», разделенной тонким вакуумным зазором, температура полимера выше допустимой (рисунок 1, в). В этом случае поверхностный потенциальный барьер (показан пунктирной линией) металла и полимера одинаков ($j_2 = j_1$). Это объясняется деструктивными процессами в приповерхностных слоях полимера, вызванными его высокой температурой. Эти процессы привели к образованию в них жидкостных островков.

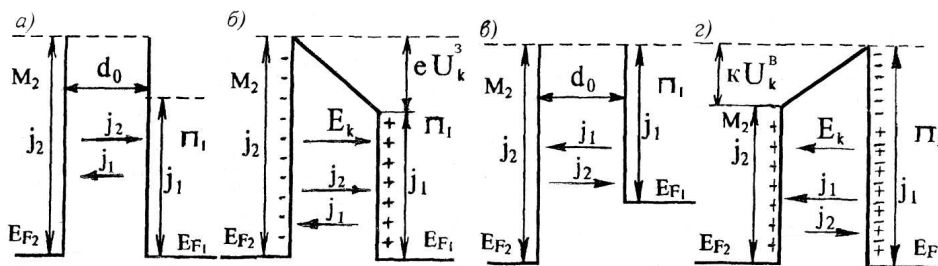


Рисунок 1 – Контактные явления в паре трения «металл (М2)-полимер (П1)» при работе накладки в интервале температур ниже (а) и выше (б) допустимой температуры для ее фрикционного материала и в случае установления энергетического равновесия (б, г)

Островки жидкости являются слабыми электролитами, которые позволяют водороду или металлу стать положительными зарядами (катионами), а кислотный радикал жидкостей получает отрицательный заряд, образуя, таким образом, анионы. Толщины жидкости, которые находятся в приповерхностных слоях, насыщены катионами и анионами, образуя между собой внутреннее электрическое поле $E_k^{(вт)}$ с соответствующей разностью потенциалов $u_k^{(вт)}$. При этом $E_k^{(вт)}$ становится намного большим $E_k^{(вн)}$. Исходя из равенства $j_2 = j_1$ (см. рисунок 1, г), получаем, что потенциальный барьер для катионов, которые движутся справа налево, т.е. $\varphi_1 + ku_k^{(ем)}$, должен быть равным потенциальному барьеру для электронов, которые движутся слева направо, т.е. φ_2 . Следовательно, имеет место равенство:

$$\varphi_1 + ku_k^{(ем)} = \varphi_2. \quad (8)$$

После установления равновесия возникает контактная разность потенциалов

$$u_k^{(вт)} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{k}. \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) используется для оценки градиента поверхностного потенциала в металлополимерных парах трения различных типов фрикционных узлов.

Темпы протекания импульсов электрического и теплового токов в металлополимерных парах трения.

Рассмотрим темпы протекания импульсов электрического и теплового токов в микровыступах поверхностей трения металлополимерных пар.

Остановимся на электрических и тепловых токах, возникающих в металлополимерных парах трения. В таблице 1 приведены расчетные зависимости, описывающие электрические и теплообменные процессы при работе металлополимерных пар трения. В зависимости (11), касающейся теплопроводности, применен темп протекания теплового тока $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)$. Темп накопления и рассеивания

теплоты $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta \tau}\right)$ использован в зависимостях: (10), описывающей протекание электрического тока; (12) и (13), относящихся к конвективному и излучательному вынужденному охлаждению.

Таблица 1 – Темпы импульсного протекания электрических и тепловых токов через микровыступы поверхностей трения металлополимерных пар

Вид энергии		Расчетные зависимости
Электрическая		$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = I^2 R;$ (10)
Вид теплообмена	Кондуктивный	$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{(\Delta Q / \Delta \tau)}{mc};$ (11)
	Вынужденное охлаждение: конвективное;	$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \alpha(t_1 - t_2);$ (12)
	излучательное	$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = e_1 c_1 A(t_1^4 - t_2^4)$ (13)

В таблице 1 в зависимостях (10)-(13) использованы следующие обозначения: $\Delta Q / \Delta \tau, \Delta t / \Delta \tau$ – темпы изменения количества теплоты (Дж/с) и температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$); R – электрическое сопротивление контактов микровыступов, Ом; ΔQ – изменение тепловой энергии, Дж; m – масса слоев элемента трения, кг; c – теплоемкость элемента трения, Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); α – коэффициент теплоотдачи от поверхностей металлического элемента трения, Вт/(м $^2\cdot^{\circ}\text{C}$); t_1, t_2 – температуры: поверхности трения и окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; e_1 – безразмерное число, изменяющееся от 0 до 1,0; C_B – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м $^2\cdot\text{K}^4$); A – площади полированных и матовых поверхностей металлического элемента трения, м 2 .

Полученные зависимости (10)-(13) позволяют оценивать темпы импульсного протекания электротепловых токов через микровыступы поверхностей трения металлополимерных пар трения различных типов фрикционных узлов тормозных устройств и устанавливать их допустимые величины.

Выводы. Таким образом, раскрыта природа протекания темпов импульсов электротепловых токов в микровыступах поверхностей тормозных устройств с прямыми и обратными парами трения.

Библиографический список использованной литературы

1. Джанахмедов А.Х. Триботехнические проблемы в нефтегазовом оборудовании / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 1998. – 216 с.
2. Основы трибологии / Под ред. Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
3. Воробьев А.А. Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким при действии импульса напряжения (диплом открытия №107) / А.А. Воробьев, П.А. Воробьев, А.Т. Чепиков. – Заявитель: Научно-исследовательский институт высоких напряжений Томского политехнического университета (Россия). Приоритет открытия: 14 декабря 1961 г.
4. Фадин Ю.А. Кинетика разрушения поверхности металлических материалов при трении: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.04 / Фадин Юрий Александрович. – Санкт-Петербург, 1997. – 208 с.
5. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский. – Самара: Самарск. государств. техн. ун-т, 2000. – 267 с.

Поступила в редакцию 06.06.2013 г.

Вольченко Д.О., Малик В.Я., Карась В.В. Темпи протікання імпульсів електротеплових струмів у мікроступах поверхонь тертя гальмівних пристроїв.

Розкрита сутність темпів протікання імпульсів електротеплових струмів у мікроступах поверхонь тертя гальмівних пристроїв і наведені їх розрахункові залежності.

Ключові слова: імпульс, електричний струм, тепловий струм, мікроступи, поверхні тертя, пари тертя, фрикційний вузол, гальмівний пристрій.

Volchenko D.O., Malyk V.Y., Karas V.V. The rates of flowing of impulses of electro-thermal currents in micro-ledges of surfaces friction of braking devices.

Essence of rates of flowing of impulses of electro-thermal currents is exposed in the micro-ledges of surfaces of friction of brake devices and their calculation dependences over are brought.

Keywords: impulse, electric current, thermal current, micro-ledges, surfaces of friction, pairs of friction, friction knot, brake device.