

УДК 62-92.113

И.О. Бекиш, доцент, канд. техн. наук,

Н.В. Кашуба, преподаватель,

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,

ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019

Е.В. Гороть, ст. преподаватель

Бережанский агротехнический институт

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

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Проиллюстрирована оценка электропроводности поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения тормозных устройств, исходя из их энергетических уровней.

Ключевые слова: *поверхностный и приповерхностный слой, пара трения, металлический и полимерный элемент, электропроводность, тормозное устройство.*

Введение. Металлополимерные пары трения тормозных устройств эксплуатируются на различных тормозных режимах. Последние и определяют энергетические уровни поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения тормозных устройств. Однако, в работе [1] при оценке закономерностей формирования энергетических уровней металлополимерных пар трения не была учтена электропроводность их поверхностных и приповерхностных слоев, которая в значительной мере влияет на эффективность торможений.

Состояние проблемы. Разрозненные данные об энергоёмкости металлического фрикционного элемента и полимерной накладки имеющей разный электрический потенциал в зависимости от ее теплового состояния заставляет искать путь подавления трибоэффектов при импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения. Одним из таких путей является определение электропроводности поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения.

Цель работы. Оценить электропроводность поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения тормозных устройств, исходя из их энергетических уровней. При этом рассматривать указанные слои полимерной накладки до допустимой температуры и выше ее для фрикционных материалов накладки.

Электропроводность поверхностных и приповерхностных слоев металлического элемента трения. Величина удельного электрического сопротивления существующих материалов отличается более чем на 30 порядков: приблизительно от 10^{22} до 10^{-10} Ом·м [2]. При классификации материалов по величине удельного электрического сопротивления их принято разделять на два класса: изоляторы и металлы.

В неидеальной кристаллической решетке, искаженной дефектами, примесями инородных атомов и т.д., в поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения фрикционного узла помимо чисто периодического потенциала ионных остовов на электрон действует также случайный потенциал $\varphi(r)$, вызванный контактно-импульсным взаимодействием микровыступов поверхностей трения. В таком потенциале электроны предпочитают находиться в областях минимума энергии, т.е. в «ямах» случайного потенциала. Если «горные вершины» (1) и «перевалы» (2) случайного потенциала (рисунок 1 а) (разделяющие потенциальные ямы) высоки по сравнению с характерными энергиями $k_B T$ (энергиями электронов узкого слоя вблизи уровня Ферми) и E_F (энергиями уровня Ферми, k_B – постоянная Больцмана; T – температура), то электрон не может уйти за пределы своей ямы в течение длительного времени. Амплитуда его волновой функции экспоненциально затухает на расстояниях, больших некоторого радиуса локализации ξ , подобно функции $\exp(-|r|/\xi)\cos(kr)$. Такая ситуация изображена на рисунок 1 б. Электроны локализованы в пространстве вблизи минимумов $\varphi(r)$ (см. рисунок 1 в) на расстояниях порядка ξ . Они не принимают участия в переносе заряда, если ξ намного меньше размера образца L и среднего расстояния между электронами a (порядка $1/n^{d/2}$), которое для уровня Ферми равно λ_F (здесь $d=1, 2$ или 3 – количество поверхностных и приповерхностных слоев металлического элемента трения).

Сопротивление металлического элемента трения падает при понижении температуры, благодаря уменьшению рассеивания электронов при температурных колебаниях решетки (кванты которых называются фононами). При низких температурах электроны в металлическом элементе трения занимают все квантовые уровни энергии вплоть до самого высокого значения E_F , называемого уровнем Ферми. В процессах переноса заряда (т.е. электропроводности) принимает участие лишь небольшая часть электронов, занимающих по энергии узкий слой толщиной порядка $k_B T$ вблизи уровня Ферми.

Металлический элемент трения относится к образцу, в котором $L \gg \xi$. В таком элементе электроны могут находиться в двух принципиальных состояниях – «делокализованном» и «локализованном», отвечающих свободно распространявшимся или затухающим плоским волнам. Волновые функции этих двух электронных состояний ортогональные, поэтому электроны не могут переходить из одного состояния в другое [3].

При увеличении степени разупрочнения, т.е. при увеличении амплитуды случайного потенциала, рано или поздно все состояния электронов станут локализованными. Поэтому можно ожидать, что под влиянием беспорядка произойдет их переход из поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения в поверхностный и приповерхностный слой полимерной накладки. При этом должна реализоваться некоторая критическая величина беспорядка, вызывающая переход металла в диэлектрик. Ей соответствует критическая величина удельной проводимости σ_{\min} , так называемая минимальная проводимость поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения. Эту идею выдвинул Мотт, который предположил, что переход в металлополимерной паре трения носит скачкообразный характер. Вывод Мотта был основан на более ранних результатах А.Ф. Иоффе и А.Р. Регеля, обративших внимание на то, что в разупрочненном поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения классическая теория проводимости теряет смысл при условии, когда длина свободного пробега электрона l сравняется с порядком величины λ_F . В квантовой физике есть единственная комбинация фундаментальных констант, имеющая единицу измерения сопротивления, – это «квант сопротивления» $h/e^2 \approx 25812,0$ Ом, где h – постоянная Планка.

Подставляя в выражение $\sigma = ne^2 l / (\Phi_F m)$ для определения проводимости поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения длину пробега Иоффе-Регеля, получили уравнение минимального значения удельной проводимости, которую имеет указанный выше слой:

$$\sigma_{\min} = \frac{4e^2}{3h\lambda_F} \quad (\text{для } d=3); \quad (1) \quad \text{и} \quad \sigma_{\min} = \frac{e^2}{h} \quad (\text{для } d=2). \quad (2)$$

Из приведенных зависимостей (1) и (2) следует, что понижение температуры разупрочненного поверхностного и приповерхностного слоев металлического элемента трения способствует изменению проводимости. Эти зависимости проиллюстрированы на рисунке 2 в различных интервалах удельного сопротивления $\rho = 1/\sigma$:

– если исходное классическое удельное сопротивление Друде мало, $\rho < \rho_c = 1/\sigma_{\min}$, т.е. беспорядок в поверхностном и приповерхностном слое металлического элемента трения мал, то при $T \rightarrow 0$ сопротивление должно падать до нуля, а слой должен стать идеальным;

– если беспорядок велик и $\rho > \rho_c$, то при $T \rightarrow 0$ сопротивление должно возрастать, а поверхностный и приповерхностный слой должен стать полимерным с $\sigma = 0$.

Рассмотренное выше оставляет открытым вопрос о возможности существования странного критического состояния «неидеального» поверхностного и приповерхностного слоя металлического элемента трения – при критическом значении беспорядка (при $\rho = \rho_c$) его сопротивление будет конечной величиной при $T = 0$.

Анализ «быстрых» и «медленных» процессов (см. рисунок 3) показывают, что их закономерности имеют одинаковую волновую природу. На рисунке 3 под испытанием типа II подразумевается движение автотранспортного средства ЗИЛ-130 под углом 6° со скоростью 30 ± 5 км/ч при тормозных испытаниях.

Электропроводность поверхностных и приповерхностных слоев полимерного элемента трения. При контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар при незначительном изменении внешних параметров, таких как нормальные усилия, удельные нагрузки, внешние электрические, магнитные и тепловые поля и т.п. большинство фрикционных материалов претерпевают изменение электропроводности на многие порядки, переходя из «диэлектрического» в «металлическое» состояние или наоборот для их поверхностных и приповерхностных слоев.

При классическом подходе к оценке свойств фрикционных материалов необходимо измерить их электропроводность и установить ее зависимость от температуры (рисунок 2). В «хороших» проводниках длина волны электрона λ_F намного меньше длины его свободного пробега. Исходя из этого, движение электрона может быть описано как случайное движение квазиклассической частицы. Результатом является хорошо известное выражение Друде-Больцмана для проводимости [4]:

$$\sigma = ne^2 \tau / m, \quad (3)$$

где n – количество зарядов; e – величина элементарного заряда; τ – время пробега зарядов между столкновениями; m – эффективная масса электрона.

Электропроводность твердой поверхности полимерной накладки обусловлена наличием жидкости при температурах, превышающих допустимую для материала накладки, различных дефектов и загрязнений поверхности. Как уже отмечалось, жидкость является сильнополярным веществом, обладающим заметной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности полимерной накладки при работе металлополимерной пары трения, чтобы в значительной мере зашунтировать ее высокое объемное сопротивление. Адсорбция влаги на поверхности полимерной накладки зависит, прежде всего, от относительной влажности окружающей среды. Вместе с тем поведение фрикционного материала накладки во многом определяется и особенностями ее внутреннего строения. Поэтому удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как параметр самой полимерной накладки.

По характеру взаимодействия с влагой полимеры подразделяют на гидрофобные и гидрофильные. Гидрофобными называют материалы, поверхности которых не смачиваются жидкостью. В эту группу входят неполярные и слабополярные полимерные материалы. Поверхность таких полимеров не заряжена, и поэтому ее взаимодействие с диполями жидкостей оказывается слабым. Под действием сил поверхностного натяжения конденсируемая на поверхности накладки влага собирается в виде разрозненных капель (рисунок 4 а) при разомкнутой паре трения. При этом краевой угол смачивания θ оказывается большим (более $\pi/2$). Поэтому даже в условиях очень высокой влажности на поверхности фрикционной накладки не образуется сплошная жидкостная пленка.

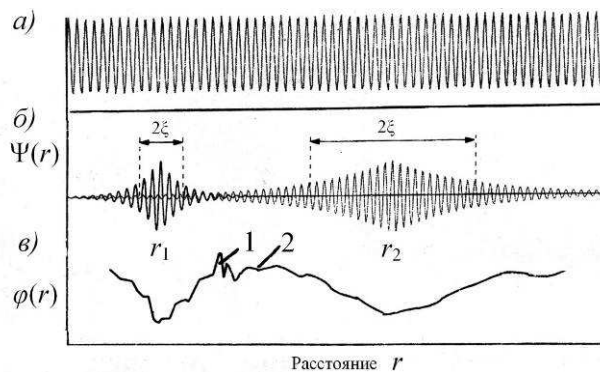


Рисунок 1 – Схематическое изображение волновых функций в зависимости от координаты: а - для делокализованных точек; б - двух локализованных вблизи точек r_1, r_2 ; в - электронных состояний в случайном потенциале

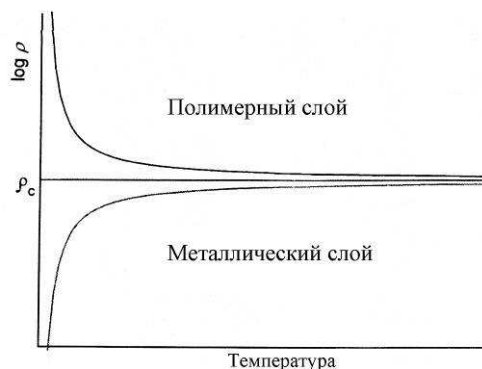


Рисунок 2 – Температурная зависимость удельных сопротивлений электропроводимостей поверхностных и приповерхностных слоев в паре трения «металл-полимер»

У таких полимерных материалов удельное поверхностное сопротивление, как правило, велико ($\rho=10^{17}$ Ом) и слабо зависит от влажности окружающей среды.

Гидрофильными называются материалы с малым углом смачивания, т.е. менее $\pi/2$ (рисунок 4 б). Ими являются, главным образом, полярные органические и ионные полимеры. В таких материалах энергия межфазного взаимодействия оказывается больше энергии взаимодействия между диполями жидкости. В условиях высокой влажности жидкость растекается по поверхности гидрофильного полимера, образуя проводящую ток пленку. Удельное поверхностное сопротивление (ρ) таких полимеров в значительной мере зависит от влажности воздуха. Особенно заметное снижение ρ наблюдается при

относительной влажности более 60%. Вместе с тем в сухой атмосфере ρ у ионных кристаллов может быть достаточно высоким и достигать значений, близких 10^{17} Ом·м.

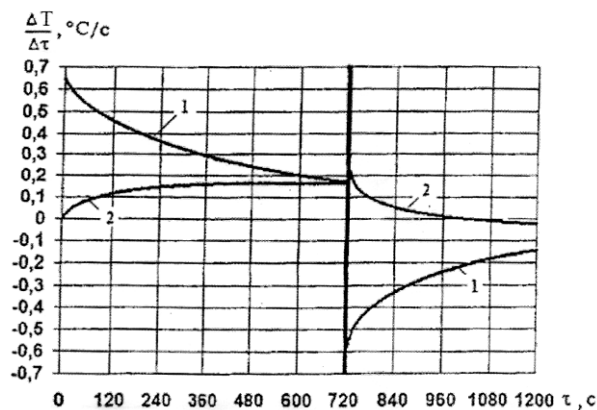


Рисунок 3 – Темпы нагревания обода 1 и боковой стенки 2 заднего тормозного барабана автотранспортного средства ЗИЛ-130 при испытаниях II – го типа и при вынужденном охлаждении продолжительностью 480 с

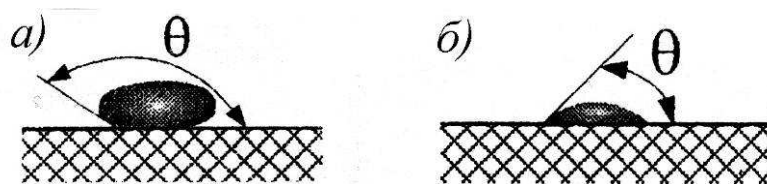


Рисунок 4 – Форма капель жидкости на поверхности: а - гидрофобного полимерного материала; б - гидрофильного полимерного материала, θ – краевой угол смачивания

Выводы. Таким образом, приведена оценка электропроводности поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения тормозных устройств, исходя из их энергетических уровней.

Библиографический список использованной литературы

1. Закономерности формирования энергетических уровней металлополимерных пар трения / А.И. Вольченко, Н.С. Кулик, М.В. Киндрачук [и др.] // Проблемы тертя та зношування: наук. Техн. зб. – К.: НАУ, 2013. – Вып. 59. – С. 3 – 22.
2. Поплавко Ю.М. Физика активных диэлектриков / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, И.П. Раевский. – Ростов – на – Дону: Из-во Южного федерального университета, 200. – 480 с.
3. Сесслер С. Электреты / С. Сесслер. – М.: Мир, 1983. – 481 с.
4. Основы трибологии / Под ред. Чичнадзе А.В. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

Поступила в редакцию 15.05.2013 г.

Бекіш І.О., Кашуба М.В., Гороть Є.В. Електропровідність поверхневих та при поверхневих шарів металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв

Проілюстрована оцінка електропровідності поверхневих та при поверхневих шарів металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв, виходячи із їх енергетичних рівнів.

Ключові слова: поверхневий та при поверхневий шар, пара тертя, металевий і полімерний елемент, електропровідність, гальмівний пристрій.

Bekysh I.O., Kashuba M.V., Gorot Ye.V. Electrical conductivity of the surface and in the surface layers of metal-vapor friction brake devices

Illustrated assessment of surface conductivity and surface layers in metal-vapor friction braking devices, based on their energy levels.

Keywords: surface and in the surface layer, friction pair, metal and polymer element, electrical, brake unit.