

УДК 621.891

А. И. ВОЛЬЧЕНКО¹, Н. С. КУЛИК², М. В. КИНДРАЧУК²,
Д. А. ВОЛЬЧЕНКО¹, Н. А. ВОЛЬЧЕНКО³, Н. М. СТЕБЕЛЕЦКАЯ²

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

²Национальный авиационный университет, Украина

³Кубанский государственный технологический университет, Россия

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ

Проиллюстрирована роль поверхностных и приповерхностных слоев полимерных накладок в формировании энергетических уровней металлополимерных пар трения тормозных устройств. Энергетические уровни оценивались динамическим, электрическим и температурными градиентами неустойчивого состояния поверхностей металлополимерных пар трения

Ключевые слова: энергетические уровни, полимерная накладка, пара трения, тормозные устройства, градиенты температуры.

Введение. Поверхностный и приповерхностный слой полимерной наклейки, работающий в паре с металлическим фрикционным элементом, которая в процессе торможения попадает в зону энергонагруженности ниже и выше допустимой температуры для ее фрикционных материалов, является диэлектриком, долго сохраняющим заряды разного или одного знака [1]. После завершения процесса торможения, внешнее воздействие остается (нагретый поверхностный и приповерхностный слой наклейки), способствуя тем самым сохранению зарядов до следующего контактно-импульсного взаимодействия микровыступов металлополимерных пар трения.

Природа контактно-импульсного взаимодействия микровыступов в паре трения «полимер-металл». При взаимодействии металлополимерных пар трения тормозных устройств контакт носит дискретный характер из-за постоянной смены его элементарных участков. Последние представляют собой очаги «электрических» и «термических» неровностей. «Электрические» очаги способствуют генерированию электрических токов с помощью сформированных микротермобатарей с различными свойствами материалов и поэтому они работают в режиме микротермоэлектрогенератора и микротермоэлектрохолодильника [2; 3]. Одни участки нагреваются, а другие – охлаждаются. «Термические» очаги нагреваются за счет трибозффекта. В дальнейшем более разогретые участки поверхности трения в результате термического расширения и податливости приподнимаются над остальной поверхностью и начинают вследствие этого воспринимать всю приложенную нагрузку. Так будет продолжаться до тех пор, пока локальный износ этого участка не приведет к понижению его уровня, после чего опять произойдет перераспределение нагрузки, которая окажется приложенной к другим участкам поверхности.

В процессе фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения, т.е. при скольжении микровыступов, металлический фрикционный элемент получает микроимпульсы со стороны микровыступов неподвижного контртела, которым является рабочая поверхность полимерной наклейки (прямая пара трения). В обратных парах трения все происходит наоборот. В многопарных фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза на разных стадиях торможения

наблюдаются сначала обратные пары трения, а затем прямые. Импульсные колебания величины нормального усилия, действующего со стороны тормозной ленты, определяются жесткостью фрикционного стыка.

На рис. 1 проиллюстрировано контактно-импульсное взаимодействие микровыступов на различной стадии торможения парой трения «полимер – металл» при ее нагружении нормальной силой N . Различная величина N на каждой из стадий торможения пропорциональна площади контакта. На первой стадии контактирования (рис. 1, а) происходит импульсное взаимодействие микровыступов, способствующее генерированию элементарного электрического тока. В дальнейшем на второй стадии электрический ток якобы гасится и превращается в аккумулируемую теплоту. На третьей стадии взаимодействия микровыступов нормальная сила N является максимальной, площадь контактирующих поверхностей увеличивается, а, следовательно, наблюдается рост трибозффекта, т.е. поверхностной температуры контакта. Суммирование элементарных электроточков, генерируемых на микровыступах (первая стадия торможения), позволило сформировать электрическое поле на взаимодействующих поверхностях контактов. Формируемое тепловое поле на второй и третьей стадии способствует его росту, и как следствие, к увеличению тепловых токов.

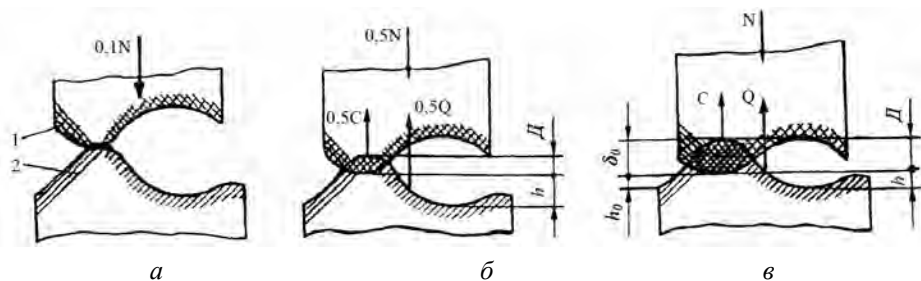


Рис. 1. Контактно-импульсное взаимодействие микровыступов пары трения «полимер (1) – металл (2)» при различной нагруженности микровыступов: а – $0,1N$; б – $0,5N$; в – $1,0 N$; D – деформация полимерного микровыступа; Q – реакция металлического микровыступа; C – жесткость фрикционного стыка

Между участками фактического касания расположены микро- и макропозности, соединяющиеся между собой и заполненные жидкостью, образовавшиеся за счет выгорания связующих компонентов полимерных накладок, продуктами износа [4]. Указанные полости имеют сужения и расширения по высоте. При вращении металлического фрикционного элемента промежуточная среда увлекается его скользящей поверхностью и в местах сужения образуются гидродинамические клинья. Действие последних суммируется и может привести к всплыванию или подъему одной поверхности над другой.

По мере всплывания тел микронеровностей уменьшается контактная деформация и часть нормальной нагрузки, воспринимаемой суммарными опорными поверхностями микровыступов, одновременно увеличивается часть нормальной нагрузки, приходящейся на жидкостной слой накладки.

Наблюдаемая упругопластическая деформация поверхностных слоев на площадках фактического контакта, приводящая к их постепенному охрупчиванию за счет электроимпульсного прошивания волнистости и шероховатости поверхностей, а также к диспергированию, позволяет представлять процесс изнашивания в виде малоциклового усталости материала поверхностных слоев, расположенного в зоне деформирования.

В течение незначительного времени не наблюдается разрушения поверхности трения и отделения частиц износа, т.е. наблюдается существование латентной фазы [4], но при этом происходит накопление энергии, микродефектов, развитие и эволюция вторичных структур. При достижении предельного состояния материала поверхностного слоя, обусловленного появлением определенной концентрации микрповреждений, наступает стадия разрушения поверхностного слоя.

Поверхностный слой необходимо рассматривать как синергетическую саморегулирующуюся систему, которая способна к внутренним перестройкам при достижении внутренней энергией системы определенного порогового значения - энергии активации.

Изучение процессов взаимодействия, протекающих на нано-, микро- и макроскопических уровнях позволяет установить связи возникновения циклов изнашивания с кинетическими фазовыми переходами механизмов диссипации энергии, происходящей в результате самоорганизации и эволюции диссипативных дислокационных субструктур.

Контактно-импульсное взаимодействие пар трения: «металл-металл». Многочисленными исследованиями установлено [4; 5], что площадь фактического контакта составляет незначительную долю номинальной площади контактно-импульсного взаимодействия, определяемой их геометрическими размерами. Отсутствие сплошности контакта при соприкосновении пары трения «металл-металл» существенно меняет картину течения теплоты от первого элемента пары ко второму. При низкой микрополости между пятнами контактов, и слабым лучистым теплообменом, передача теплоты происходит только через места фактического контактирования, пятна которого имеют различное сопротивление. Поэтому по мере приближения к поверхности сопротивления (пятну контакта) линии теплового тока стягиваются к пятнам фактического контакта, что ведет к увеличению плотности теплового потока, о чем свидетельствует рис. 2. При этом полагаем, что контакт происходит по вершинам выступов микронеровностей и с учетом того, что для большинства реальных контактов, расположенных дискретно, продольные сечения зазора между ними значительно больше поперечного. Последнее обстоятельство позволяет пренебречь продольной теплопроводностью среды в зазоре, а также эффективностью ее вынужденной конвекции. Лучистый теплообмен с поверхностями пустот между пятнами контакта не учитывался.

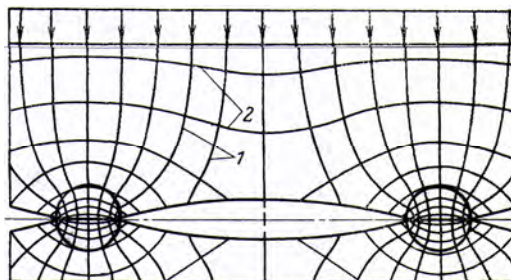


Рис. 2. Линии теплового тока (1) и изотермы (2) в зоне контактных пятен (схема)

На пятне контакта наблюдается равенство поверхностных температур. Поверхности, ограничивающие полости микровыступов, не являются изотермическими и их температуры отличаются от температуры на площадках пятен фактических контактов. Возникающий градиент температур обеспечивает передачу теплоты за счет теплопроводности среды (вызванной импульсными искровыми

электрическими разрядами), находящейся в полостях между микровыступами. По мере увеличения проводимости среды в зазорах, интенсивность стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта ослабевает, флуктуации плотности теплового потока по поверхности выравниваются и при достижении одинаковой проводимости среды и материалов пятна контакта плотность теплового потока становится равномерной.

На рис. 2 выделены «граничные» линии тока, отделяющие область основного теплового потока, идущего через площадку фактического контакта, от области дополнительного теплового потока, идущего через промежуточную среду в зазоре между микровыступами.

В паре трения «металл-металл» в сопряжении имеет место равенство плотностей тепловых потоков и температур на границах различных сред. Однако к решению данной задачи можно подойти с несколько иных позиций.

Для этого рассмотрим течение теплоты через зону сопряжения двух тел. Контакты имеют периодический характер и элементы трения выполнены в виде полос с шириной, равной шагу выступов $2b$ (рис. 3), т.е. имеем двухмерный контакт. Спрогнозируем изменение температуры вдоль оси, совпадающей с осью контактного выступа. Принимаем вначале, что дополнительный поток теплоты через зазор отсутствует. Это соответствует контакту в вакууме при пренебрежимо малом лучистом теплообмене. В связи с тем, что тепловой поток пропорционален градиенту температуры, по мере его приближения к плоскости стыка, начиная с некоторых значений $x=x_1$ или $x=-x_1$, соответствующих началу заметного стягивания линий теплового тока к месту фактического контакта, градиент температуры начинает расти и температурная кривая приобретает вид, показанный на рис. 3.

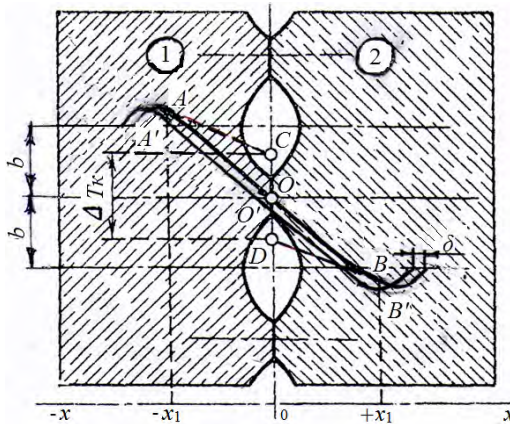


Рис. 3. Распределение температур в паре трения «металл-металл», вызванное основным и дополнительным тепловым потоком

Линия AOB является боковиной синусоиды с большим периодом, подтверждающим волновую теорию распространения температуры в паре трения «металл-металл».

Если не брать во внимание допущение об отсутствии дополнительного теплового потока через зазор, то общий характер изменения температуры по оси выступа будет минимальный. Это произойдет тогда когда проводимость среды достигнет проводимости контактирующих материалов, распределение температур в телах 1 и 2 будет соответствовать кривым $A'O'$ и $O'B'$ параллельным AO и OB . Линия $A'O'B'$ является боковиной синусоиды, которая на долю периода смещена по фазе на величину δ .

Таким образом, в действительности распределение температур носит синусоидальный гармонический характер как без учета теплопроводности среды, так и с ней при условии, что температуры в стыке контакта равны, а использование мнимого температурного скачка ΔT_K по длине стыка, находящегося между зазорами со средой, позволяет оценить ее теплопроводную способность и подготовить почву для электроимпульсного разряда.

«Полимер-полимер». Электризация поверхностей полимерной накладки и полимерной пленки, производится за счет массопереноса на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента при контактно-импульсном взаимодействии друг с другом и является суммой двух эффектов: кинетического и равновесного. Кинетический эффект вызван тем, что металлический фрикционный элемент с полимерными пленками на своих рабочих поверхностях вращается, а рабочая поверхность полимернойкладки является неподвижной. В этом случае, вызывающий электризацию кинетический эффект, связывают с тем, что взаимодействующая пленка металлического фрикционного элемента нагревается больше, чем неподвижная полоса поверхности полимернойкладки. Для изучения пары трения «полимер-полимер» большое значение имеет равновесный эффект. Этот эффект возникает на начальной и конечной стадиях контактно-импульсного взаимодействия двух полимерных пятен контакта, при том что пленка металлического фрикционного элемента является частично изношенной.

Изучение контактной электризации в вакууме (иногда вакуум возникает между взаимодействующими парами трения в тормозных устройствах) при температурах ниже допустимой для материалов полимернойкладки позволяющим исключить влажность циркулирующего воздуха, показывает что она обусловлена передачей ионов от одной к другой пленке и наоборот. Указанный процесс описывается с помощью работы выхода – величины, широко используемой в теории металлов и полупроводников, а также и полимеров.

Предположим, что положительные заряды (ионы) однородно распределены в полимерной накладке с объемной плотностью ρ до глубины δ , что позволяет сформировать поверхностную плотность заряда $\sigma = \rho\delta$ и среднее поле напряженностью $\sigma/2\varepsilon_1\varepsilon_2$ ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрическая проницаемость материалов первой и второй пленки). Приравнивая последнее к полю $\Delta W/e\delta'$, обусловленному различием в работах выхода ΔW двух ограничивающих область заряда поверхностей (макро- и микроучастков), определим плотность введенного заряда в виде

$$\sigma = 2\varepsilon_1\varepsilon_2\Delta W / e\delta'. \quad (1)$$

В зависимости от различных гипотез о захвате носителей первой и второй полимерной пленкой, имеющих разную подпитку носителей в процессе их контактно-импульсного взаимодействия, прогнозируется различная связь σ с ΔW . Например, если глубина δ' залегания зарядов в приповерхностном слое полимернойкладки не зависит от ΔW , то такая связь является линейной. Данное условие устанавливает определенную зависимость ΔW от объемной плотности ρ . Все зависит от количества уровней захвата рассматриваемых участков поверхностей двух полимерных материалов. Если имеется лишь один дискретный уровень захвата, то плотность ρ является постоянной и вместе с зависимостью $\delta = \frac{\sigma}{\rho}$ дает

$$\sigma = \sqrt{2\varepsilon_1\varepsilon_2\rho\Delta W} / e^+. \quad (2)$$

Выведенная зависимость (2) имеет сходство с зависимостью, которая установлена В. Харпером.

Таким образом, поверхностная электризация пары «полимер-полимер» в большинстве случаев имеет линейную зависимость.

На рис. 4 *а* приведена зависимость плотности зарядов σ от контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ для пары трения «полимер-полимер» (типа РТФЕ, где *P* – полимер, TFE – сополимер).

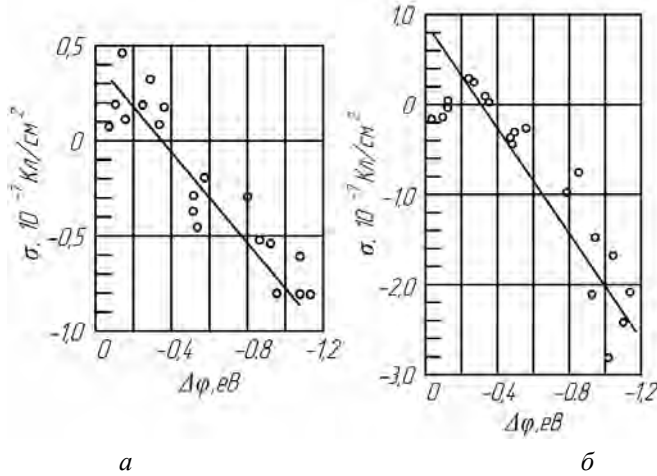


Рис. 4. Зависимость плотности зарядов σ от контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ для пары трения: *а* – «полимер-полимер» (типа РТФЕ – *P* – полимер; TFE – сополимер по данным Г.Сесслера); *б* – «металл-металл» (разные металлы составляют поликарбонат по данным Г.Сесслера)

Как указывалось ранее, линейная закономерность объясняется постоянством глубины проникновения или однородностью энергетического распределения уровней захвата. Последнее, однако, у полимеров обычно не обнаруживается и в то же время постоянство глубины проникновения не удается увязать с физическими моделями объемных уровней захвата. Нелинейные данные для полимерных материалов типа РТФЕ интерпретировались на основе того, что полимер с объемным распределением заряда создает такое же внешнее поле, как и полимер с поверхностными зарядами, плотности которых равны σ_1 и σ_2 . Данное условие является спорным.

На рис. 4, *б* проиллюстрирована зависимость плотности зарядов σ от контактной разности потенциалов $\Delta\phi$ для пары трения «металл-металл» (различные металлы составляют поликарбонат). При этом данные для поликарбоната показывают пропорциональность между σ и $\Delta\phi$.

При рассмотрении эффекта искривления зон вблизи контакта «металл-полимер» возникает следующая картина: при однородном распределении уровней захвата в запрещенной зоне поверхностной плотности заряда σ пропорциональна разности работы выхода ΔW ; если же ловушками служат отдельные дискретные уровни, связь σ с ΔW может колебаться от экспоненциальной в полимерной накладке, вообще не имеющей ловушек, до квадратичной в полимерной накладке с полностью ионизированными ловушками.

Как метод получения полимерных материалов контактная электризация широко не применяется главным образом из-за отсутствия точной воспроизводимости. Это явление необходимо учитывать в парах трения «металл-полимер» или

при взаимодействии металла с другими полимерными материалами поскольку это вызывает эффект нежелательной электризации, который как теоретики, так и практики всегда стремятся подавить.

Электродинамика контактного взаимодействия и в приповерхностном слое полимерной накладки. В работе [6] предложен метод определения составляющих генерированных электрических токов в металлополимерных парах трения базирующийся на экспериментально-расчетных данных, осуществляется в пять этапов на каждом из которых определяли:

- суммарный термический ток (I_T);
- суммарный ток, который возникает за счет трения скольжения и контакта взаимодействующих макроучастков поверхностей ($I_{СК}$);
- составляющую суммарного тока, который возникает за счет трения скольжения;
- составляющую суммарного тока, образованного движением заряженных частиц массопереноса (I_M);
- суммарный ток, обусловленный сорбционно-десорбционными процессами в приповерхностных слоях накладки, которые находятся при температуре выше допустимой для ее материалов (I_D).

Составляющие вышеперечисленных токов в зависимости от направления вращения тормозного барабана представлены в виде векторной диаграммы на рис. 5, а.

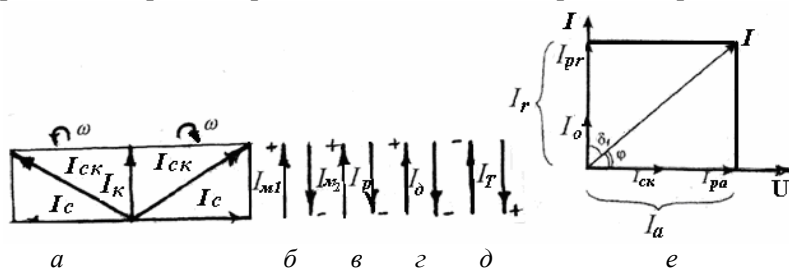


Рис. 5. Схемы направлений составляющих электрических токов в металлополимерных парах трения при температурах до (а) и выше (б – д) допустимой для материалов полимерной накладки; е – векторная диаграмма электрических токов и напряжений в приповерхностных слоях полимерной накладки

Метод определения направлений составляющих генерируемых электрических токов в парах трения «полимер-металл» освещен в работах [5; 6], опирающийся на зависимости выхода электронов и ионов, соответственно из металлического и полимерного фрикционного элемента. В конечном итоге, экспериментально регистрируемый суммарный ток (I_C) электризации с учетом направлений составляющих токов имеет вид при условии (W_M, W_{II} – работа выхода электронов и ионов)

$$W_M > W_{II} - I_C = I_{СК} + I_M + I_P - I_T; \quad (3)$$

$$W_{II} > W_M - I_C = I_{СК} - I_M - I_P + I_T, \quad (4)$$

где I_P – импульсный (разрядный) ток.

На рис. 5 проиллюстрированы схемы направлений составляющих электрических токов в металлополимерных парах трения при температуре выше допустимой для материалов полимерной накладки. На рис. 5, б, в показаны токи I_{M1} и I_{M2} , вызванные движения заряженных частиц массопереноса по схеме «полимер-металл» и «металл-полимер».

Остановимся на электродинамике поверхностного слоя полимерной накладки.

Поскольку в приповерхностном слое полимерной наклейки протекают активный I_a и реактивный I_r токи (рис. 5, *e*), составляющими которых являются токи: I_O и I_{Pr} , I_{CK} , I_{PH} – токи: реактивные, обусловленные быстрым и замедленными видами поляризации; сквозной проводимости; активный, обусловленный замедленными видами поляризации, которые заменим эквивалентной электрической схемой, содержащей идеальные сопротивления R и емкость C , обеспечивающих протекание указанных токов. Идеальные R и C соединены параллельно (рис. 6, *a*).

Условиями эквивалентности схемы замещения реальному приповерхностному слою полимерной наклейки является равенство:

- сдвига фаз между током I и напряжением U в реальном слое и в схеме замещения;
- мощности, выделяемой в схеме замещения, потерям в приповерхностном слое в реальной полимерной наклейке.

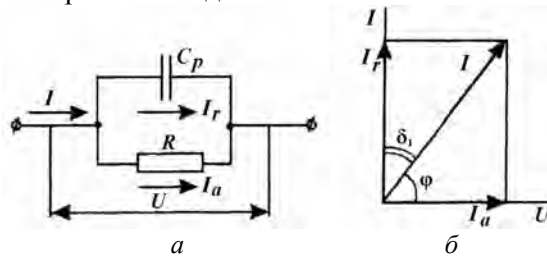


Рис. 6. Эквивалентная схема (*a*) и векторная диаграмма (*б*) параллельного замещения приповерхностного слоя полимерной наклейки

Рассмотрим параллельную схему замещения, поскольку при оценке податливости фрикционного стыка металлополимерной пары трения микровыступы соединены между собой параллельно. Векторная диаграмма токов и напряжений для параллельной схемы замещения (рис. 6, *б*) позволяет рассчитывать $\text{tg}\delta_1$ и мощность, теряемую в приповерхностном слое полимерной наклейки.

Согласно векторной диаграмме (рис. 6, *б*) для параллельной схемы замещения имеем

$$I_a = \frac{U}{R}, I_r = \frac{U}{x_c} = \omega C_p U \quad \text{и} \quad \text{tg}\delta_1 = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_p R}. \quad (5)$$

Из (5) следует

$$\frac{1}{R} = \omega C_p \text{tg}\delta_1. \quad (6)$$

Поскольку мощность, теряемая в приповерхностном слое наклейки, определяется только активной составляющей тока, то с учетом (2.6) получаем

$$W_{\text{нар}} = UI_a = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \text{tg}\delta_1. \quad (7)$$

Из (7) следует, что для данной схемы замещения потеря мощности пропорциональна $\text{tg}\delta_1$, ω и U^2 . Следовательно, правомерно характеризовать потери в приповерхностном слое в полимерной наклейке количественным параметром $\text{tg}\delta_1$. Для слоев с малым значением сопротивления r , т.е. с большими токами утечки и, следовательно, большими потерями, необходимо использовать неравенство $\text{tg}\delta_1 < 5,0 \cdot 10^{-2}$.

При нахождении приповерхностных слоев полимерных накладок в переменном электрическом поле векторная диаграмма имеет вид, показанный на рис. 6, *б*.

Согласно векторной диаграммы реактивный ток $I_r = I_O + I_{Pa}$ опережает напряжение U на 90° . Активный ток $I_a = I_{CK} + I_{Pa}$ совпадает по фазе с напряжением

U . Полный ток I сдвинут относительно приложенного напряжения на угол φ . Угол δ_1 , дополняющий угол сдвига фаз φ между током и напряжением 90° , называется углом диэлектрических потерь. Тангенс угла диэлектрических потерь характеризует потери в приповерхностном слое полимерной накладке, которые легко понять из векторной диаграммы $tg\delta_1 = I_a/I_r$.

Чем больше активный ток I_a , нагревающий приповерхностный слой полимерной наклейки, тем больше δ_1 и $tg\delta_1$ и, следовательно, больше потери. По значению $tg\delta_1$ оценивается качество приповерхностного слоя полимерной наклейки: чем он выше, тем больше будет разогрев приповерхностного слоя наклейки, а следовательно, больше площади пятен контактно-импульсного взаимодействия и меньшие удельные нагрузки на пятна контакта. Рациональные величины должны быть $tg\delta_1 \leq 10^{-4}$.

Энергетические уровни при взаимодействии пар трения «металл – полимер» с различными типами контакта. В процессе работы металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов (как и в других фрикционных системах) возможно одновременное взаимодействие рабочей поверхности фрикционной наклейки с:

- ювенильной и неювенильной поверхностью обода тормозного шкива;
- окисными и неокисными пленками поверхности обода тормозного шкива;
- перенесенным на обод тормозного шкива слоем фрикционного материала.

Указанное взаимодействие пар трения «металл – полимер» и определяет тип контакта и его энергетический уровень (рис. 7). При этом, основной характеристикой энергетического уровня того или иного контакта является работа выхода электронов из приповерхностного слоя металлического обода тормозного шкива (W_M) и ионов из приповерхностного слоя полимерной наклейки (W_{II}).

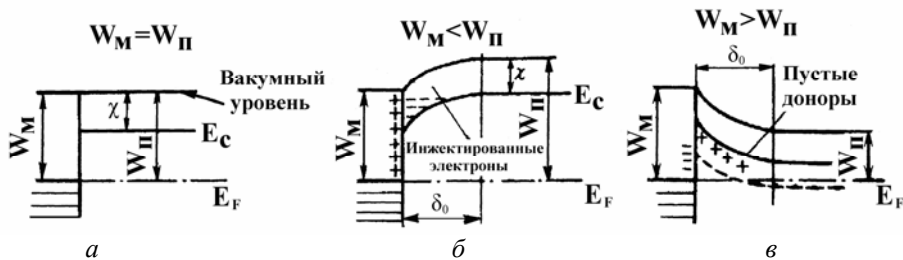


Рис. 7. Энергетические уровни для взаимодействующих пар трения «металл-полимер» с различными типами контактов: a – нейтральный; b – омический или инжектирующий; c – блокирующий; E_C, E_F – энергетические уровни: критического движения, Ферми; W_M, W_{II} – работы выхода электронов и ионов из металла и полимера; δ_0 – толщина обогащенного (b) и обедненного (c) электронами слоя; χ – электронное сродство

Пары трения ленточно-колодочного тормоза относятся к неоднородным материалам, в объеме которых сосуществуют аморфные и кристаллические фазы, возникает захват иного рода – на межфазных границах. Особенно это заметно когда происходит выгорание связующих компонентов из приповерхностного слоя полимерной наклейки, что приводит к образованию жидких островков на ее поверхности. Жидкость является своего рода электролитом сопротивление которого резко уменьшается в зависимости от степени его нагретости. Накапливание зарядов на границах обусловлено разницей в проводимостях рассматриваемых фаз (эффект Максвелла-Вагнера). При электризации такого материала носители будут или собираться вблизи данной межфазной границы, или наоборот, уходить с нее в зависимости от того, какой из двух токов проводимости

больше: притекающих к границе зарядов или уходящих от нее. Различия в локальных токах проводимости приводят также к диссипации зарядов при последующем проведении термостимулированных разрядов, так как в этом случае токи текут уже в противоположных направлениях [7].

Для процессов нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства контактов взаимодействия.

На рис. 7 условно показано различие между нейтральными, омическими и заблокированными контактами. Нейтральные контакты не препятствуют нейтрализации зарядов, поступающих из приповерхностного слоя металлического фрикционного элемента в течение термостимулированного разряда. То же можно сказать и об омических контактах, хотя в этом случае добавляется возможность инъекции внутрь заряженной поверхности накладки носителей противоположного знака. Наоборот, блокирующие контакты действуют как раз противоположным образом: они препятствуют как инъекции, так и нейтрализации зарядов. Таким образом, если контакты заблокированы, нейтрализация должна протекать целиком внутри металлического фрикционного элемента будет ли данный контакт инжектирующим электроны или же блокирующим, зависит 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.

Энергетический баланс приповерхностного слоя полимерной накладки в формировании теплового режима металлополимерной пары трения. Процессами внутренней релаксации заряда в полимерной накладке управляют явления проводимости. Последние определяются такими характеристиками: подвижностью носителей и их концентрацией; условиями инъекции зарядов на пятна контакта и т.д.

В полимерных материалах, способных длительно удерживать заряд, присутствуют центры захвата носителей, подвижность которых подавляется процессами захвата. Последний оказывает воздействие и на процессы проводимости. Помимо собственных носителей заряда в полимерном материале присутствуют и посторонние носители, инжектируемые электроны в тело выступа контакта металлополимерной пары трения.

При исследовании контактной проводимости необходимо отличать переходные процессы от стационарных на пятне взаимодействия. Это вызвано тем, что при изучении проводимости или подвижности носителей не удастся осуществлять одновременный контроль во времени за распределениями зарядов как в теле полимернойкладки, так и на ее рабочей поверхности. Отпечаток на проблему проводимости полимерного материала накладывает отсутствие его структурной однородности и чистоты.

На подвижность носителей заряда в полимерном материале оказывает влияние наличие в нем различных состояний – свободных (делокализованных) и связанных на мелких и глубоких уровнях захвата, расположенных по толщинекладки. Движение ионов с энергией вблизи поверхности пятна контакта (зоны проводимости) представляет собой квантово-механическое туннелирование между делокализованными состояниями, расположенными на шкале энергии выше края подвижности. Этот процесс происходит без какой-либо термической активации, и отвечающие ему подвижности зарядов оказываются относительно вы-

сокими – около $10 \text{ см}^3/(\text{В}\cdot\text{с})$ [1]. Для движения заряда, захваченного мелким уровнем, расположенным по энергии ниже края подвижности, необходимо определенное количество тепловой энергии, превращенной из электроимпульсной энергии при трении. Процесс движения таких зарядов становится термоактивационным и сводится к последовательным перескокам между локализованными состояниями. В этом случае подвижность зарядов меньше [около $10^2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$], нежели в первом случае. Наконец, время захвата носителей на глубоком уровне оказывается очень большим, а их подвижность с учетом такого захвата становится чрезвычайно малой [$10^{-10} - 10^{-17} \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$].

Во многих полимерных материалах, не обладающих энергетически сильными носителями, их можно создать посредством инъекции через пятно контакта из металлического фрикционного элемента. Если приток носителей вследствие инъекции превышает поток частиц, переносимых через пленку полимера накладки, то происходит ограничение токов полем образующегося пространственного заряда. В обратном случае токи определяются интенсивностью инъекции с металлических пленок пятна контакта.

Диэлектрические потери в приповерхностном слое полимерной накладки, находящемуся в переменном электрическом поле при трении, представляют собой рассеиваемую мощность, т.е. энергию генерируемую электрическим полем.

Различают две причины необратимых потерь энергии электрического поля в приповерхностном слое полимерной накладки за счет:

- нагрева токами сквозной проводимости;
- замедленных видов поляризации.

Согласно закона Джоуля-Ленца протекание тока сквозной проводимости приводит к выделению теплоты в приповерхностном слое накладки и при этом имеют место необратимые потери энергии внешнего поля.

Поляризационные процессы характеризующиеся поляризованностью P , также приводят к необратимым потерям энергии внешнего поля. Поляризованность P численно равна электрическому дипольному моменту μ единицы объема приповерхностного слоя накладки.

Если поляризационные процессы успевают следить за изменением внешнего поля, то сдвиг фаз между напряженностью поля E и поляризованностью P отсутствует (рис. 8, а). В этом случае в течение первой четверти периода поле ориентирует связанные заряды по направлению, совершая работу. Направления поля E и электрического дипольного момента μ совпадают. Кинетическая энергия связанных зарядов растет, что равносильно повышению его температуры, т.е. нагреванию приповерхностного слоя полимерной накладки, а вместе с ним и металлополимерной пары трения, что свойственно единичному режиму торможения.

Во второй четверти периода направление поля E остается прежним, а поляризованность P уменьшается, т.е. связанные заряды за счет уменьшения E начинают возвращаться в исходное состояние, отдавая накопленную кинетическую энергию, что ведет к понижению их температуры, т.е. охлаждению приповерхностного слоя полимерной накладки. В течение периода, нагревание компенсируется охлаждением и, таким образом, необратимые потери энергии отсутствуют. Такое состояние приповерхностного слоя полимерной накладки носит название установившегося за счет быстрых видов поляризации.

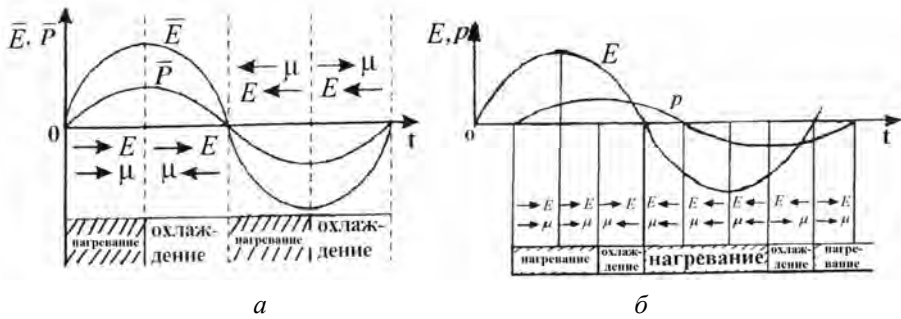


Рис. 8. Поляризация рабочей поверхности полимерной накладки при быстрых (а) и медленных (б) частотах воздействия процессами

В случае медленных видов поляризации наблюдается отставание поляризации от изменения внешнего поля (рис. 8, б). За счет сдвига фаз между напряженностью E и поляризованностью P время нагревания приповерхностного слоя полимерной накладки оказывается большим (длительный режим торможения), т.е., время накопления кинетической энергии больше времени ее отвода в металлополимерные пары трения.

Следовательно, приповерхностный слой полимерной накладки нагревается, или в нем наблюдаются необратимые потери энергии внешнего поля. Потери энергии на ориентацию связанных зарядов равносильны тому, что в поверхностном слое как бы протекает активный ток, обусловленный поляризационными процессами, отстающими от изменений внешнего поля.

Закономерности изменения эксплуатационных параметров металлополимерных пар трения тормозных устройств при единичном торможении. Знание особенностей конструкции и работы каждого из типов тормозных устройств позволяет оценить динамическую, электрическую и тепловую нагруженность их металлополимерных пар трения.

Проанализируем изменение кинематических, электрических и тепловых параметров при единичном торможении, которое реализуется на тормозном стенде, с учетом градиентов потенциалов и температуры. При этом, полное время торможения условно разделено на четыре периода (рис. 9) для случаев когда температура поверхностей трения не превышает (а) и превышает (б) допустимую для материалов полимерной накладки.

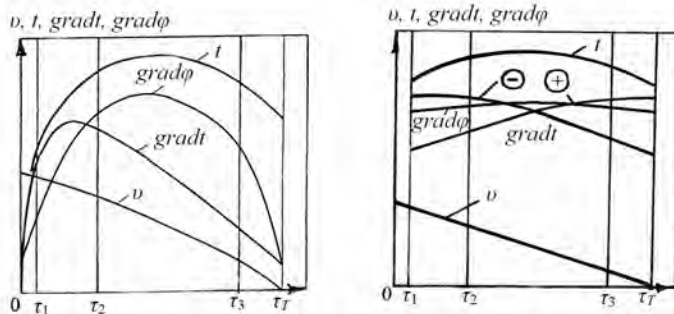


Рис. 9. Закономерности изменения скорости скольжения (v) на фрикционном контакте, поверхностной температуры (t) и потенциального ($grad\phi$) и температурного ($gradt$) градиента в металлическом элементе трения при единичном торможении по времени (τ) на четырех периодах процесса в случае, когда температура поверхности трения не превышает (а) и превышает (б) допустимую для материала фрикционной накладки

Первый период – $0 \leq \tau_T \leq \tau_1$, характеризуется высокими скоростями скольжения, импульсными взаимодействиями микронеровностей пар трения, которые способствуют генерированию импульсных токов за счет их электризации, и как следствие, возникновению разности потенциалов. Происходит слабое нагревание рабочей и нерабочей поверхности обода тормозного барабана с незначительными микроградиентами температуры по нормали к его рабочей поверхности. Импульсная температура (температура вспышки) на микроконтакте становится высокой, объемная температура почти не изменяется. При этом, импульсное нормальное усилие увеличивается, что ведет к росту удельной нагрузки на фрикционном контакте, несмотря на то, что его площадь увеличивается. Первый период времени не превышает 3 % от общего времени торможения.

Второй период – $\tau_1 \leq \tau_T \leq \tau_2$, характеризуется высокими скоростями скольжения, увеличивающимися удельными нагрузками, высокими значениями температур рабочей и нерабочей поверхностей обода тормозного шкива, а также незначительными температурными градиентами, поскольку обод является уже прогретым. Температура вспышки превышает максимум, объемная температура растет.

Третий период – $\tau_2 \leq \tau_T \leq \tau_3$. В этот промежуток времени скорости скольжения на фрикционном контакте уменьшаются, удельные нагрузки установившимися, температура поверхности трения - наибольшей за весь период торможения и квазистабильной, потенциальный и температурный градиент стремительно падает, поскольку быстро растет объемная температура, температура вспышки - незначительная.

Четвертый период – $\tau_3 \leq \tau_T$. Скорости скольжения на фрикционном контакте весьма малые (приближаются к нулю), удельные нагрузки постоянные, температура поверхности трения обода тормозного шкива плавно падает и приближается к его объемной температуре, потенциальный и температурный градиент являются незначительными, температура вспышки практически равна нулю. Продолжительность этого периода составляет 5,0 – 8,0 % от общего времени торможения.

Из рис. 10 видно, что закономерность изменения скорости скольжения на фрикционном контакте не зависит от температуры поверхности трения и является квазилинейной. На рис. 10, б отметкой \oplus отмечен температурный градиент, направленный в сторону роста температур, то есть температурный градиент на свободной от накладок рабочей поверхности обода тормозного шкива;

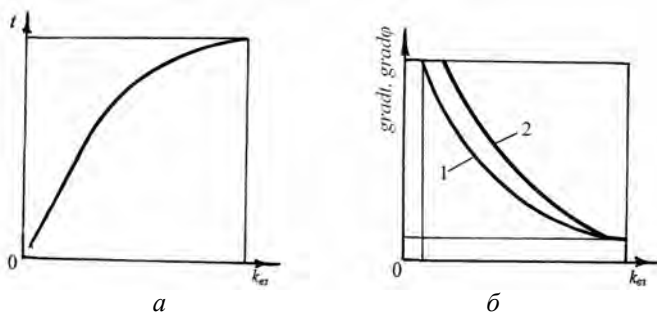


Рис. 10. Закономерности изменения поверхностных (а) и потенциального (кривая 1) и температурного (кривая 2) градиентов $[\delta]$ в металлическом элементе трения в зависимости от статического коэффициента взаимного перекрытия пар трения фрикционного узла
 отметкой \ominus отмечен температурный градиент, направленный в сторону уменьшения температур, то есть для перекрытой полимерными накладками поверхности

обода тормозного шкива. Рядом показана кривая изменения градиента потенциала, который описывается почти квазипостоянной кривой из-за выгорания связывающих компонентов из полимерной накладке и образования жидких островков на поверхности полимерной накладке, которые являются своего рода электролитом.

На рис. 10, *а* проиллюстрирована общая закономерность изменения поверхностной температуры фрикционного узла тормоза в зависимости от динамического коэффициента их перекрытия [6]. Исследования показали, что с увеличением указанного коэффициента увеличивается работа трения, а стабилизационного теплового состояния металлический элемент трения достигает раньше.

На рис. 10, *б* показаны общие закономерности изменения потенциального (кривая 1) и температурного (кривая 2) градиентов в зависимости от динамического коэффициента взаимного перекрытия пар трения фрикционного узла. С приведенных графических зависимостей выплывает, что с уменьшением коэффициентов взаимного перекрытия пар трения потенциальный и температурный градиенты увеличиваются.

Таким образом, фрикционные узлы тормозных устройств на стадиях торможения при контактно-импульсном взаимодействии сопровождаются сложными динамическими, электрическими и тепловыми эффектами, которые включают в себя: электродинамические и термодинамические процессы, поляризационные и деполяризационные процессы поверхностей, триботехнические процессы взаимодействия материалов пар трения в окружающей их среде, а также теплообмена и износа.

Экстренном и длительном торможении. Выбор объектов исследования металлических элементов трения различных барабанно-колодочных тормозов транспортных средств обусловлен условиями эксплуатации, уровнем динамической и тепловой нагруженности и, как следствие, интервалами измерения эксплуатационных параметров тормозов.

При торможении происходит генерирование токов, аккумулярование теплоты в поверхностных шарах рабочих деталей фрикционного узла. Наибольшие изменения указанные процессы вызывают у приповерхностных слоев фрикционных накладок. В процессе пластической деформации в их материалах происходит изменение структуры и свойств. Одновременно с этим непрерывно изменяются механические, потенциальные и температурные градиенты в поверхностных слоях металлополимерных пар трения, уровень которых зависит от режимов торможения.

Остановимся на температурных градиентах металлополимерных пар трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств, так как они определяют стабилизационное состояние обода тормозного барабана [8].

Закономерности изменения температур по длине (a) и толщине (b) обода и его боковой стенки (v , z) заднего тормозного барабана транспортного средства КрАЗ-50 при 12-ти минутном режиме торможения проиллюстрированы на рис. 11 (по данным Т. Дорнера). Двенадцатиминутный режим торможения относится к предварительному этапу испытаний типа II, который заключается в следующем. Проводят торможения с постоянной интенсивностью заторможенного транспортного средства со скоростью 30,0 км/ч по участку дороги протяженностью 6,0 км, имеющему продольный уклон 6,0 %. Основной этап испытаний типа II – режим испытаний тормозов транспортного средства тот же, однако при его проведении определяют эффективность тормозной системы.

Закономерности изменения температур по длине (a) и толщине (b) обода и его боковой стенки (v , z) заднего тормозного барабана транспортного средства КрАЗ-50 при 12-ти минутном режиме торможения, согласно рис. 11, получены

методом теплового моделювання на РС-сетках. Особенністю останнього являлось то, що обод барабана (a , b) розбивався на шари в горизонтальній і

вертикальній площині. В першому випадку градієнт по довжині обода барабана склав $\frac{360-160}{200} = 1,0^\circ\text{C}/\text{мм}$ (робоча поверхність), а на нерабочій поверхності обода бара-

бана градієнт був рівен $\frac{260-160}{200} = 0,5^\circ\text{C}/\text{мм}$. Що стосується бокової стінки (ϵ) обо-

да барабана, то в ній градієнт температури по висоті склав $\frac{160-20}{200} = 0,7^\circ\text{C}/\text{мм}$.

При вертикальній розбивці обода барабана на шари (b) температурний градієнт по його товщині змінювався від вільного краю обода до його заземленому краю від $360/20=18,0^\circ\text{C}/\text{мм}$ до $240/12 = 12,0^\circ\text{C}/\text{мм}$. В той же час градієнт температури по висоті бокової стінки (ϵ) склав всього $\frac{240-40}{200} = 1,0^\circ\text{C}/\text{мм}$.

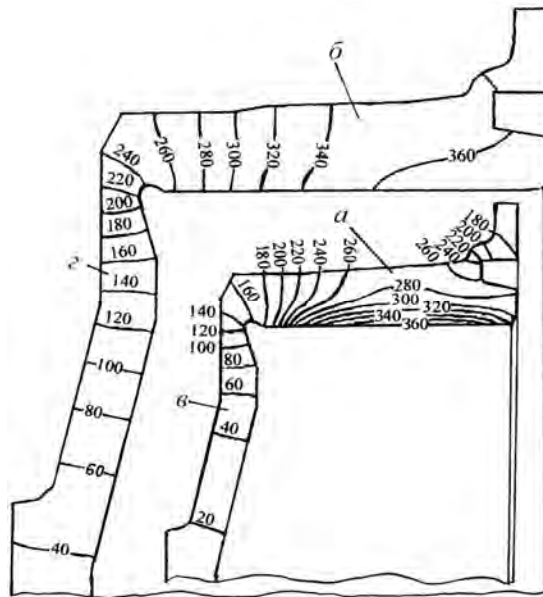


Рис. 11. Закономерности изменения температур по длине (a) и толщине (b) обода и его боковой стенки (ϵ , z) заднего тормозного барабана транспортного средства КраЗ-250 при 12-ти минутном режиме торможения

Таким образом, согласно рис. 11 (элементов a , ϵ) сток теплоты от поверхностного и приповерхностного слоя рабочей поверхности обода барабана происходит в горизонтальные слои (внутренние) боковой стенки (ϵ). При этом, наружные слои обода (a) и боковой стенки (ϵ) охлаждаются за счет конвективного теплообмена с омывающими их встречными потоками воздуха при движении транспортного средства КраЗ-250. Что касается второго случая (элементов b , z) обода тормозного барабана, в котором большие градиенты (изменяются от 18,0 до 12,0 $^\circ\text{C}/\text{мм}$) имеет место не только интенсивный отвод теплоты от наружной поверхности обода барабана за счет конвективного теплообмена к омывающему воздуху при движении транспортного средства КраЗ-250, но и отвод теплоты в тело боковой стенки (z) обода барабана кондуктивным теплообменом.

Термограммы температурных полей заднего тормозного барабана транспортного средства семейства МАЗ моделировались с помощью программы на базе МСЭ. Моделирование произведено на программном комплексе «Фурье-2ХУЗ», созданному в Институте моделирования в энергетике им. Г. С. Пухова НАЛУ. Одновременно с численными величинами, метод позволяет осуществлять качественное изображение температурных полей в виде цветных спектров.

Дискретизация заднего тормозного барабана транспортного средства семейства МАЗ производилась с помощью 163-ох конечных элементов.

По результатам моделирования установлена закономерность изменения поверхностной температуры элементов (подкрепляющего кольца, обода и фланца) тормозного барабана при достижении им стабилизационной температуры (рис. 12, *а*) и температурных градиентов по толщине элементов тормозного барабана (рис. 12, *б*).

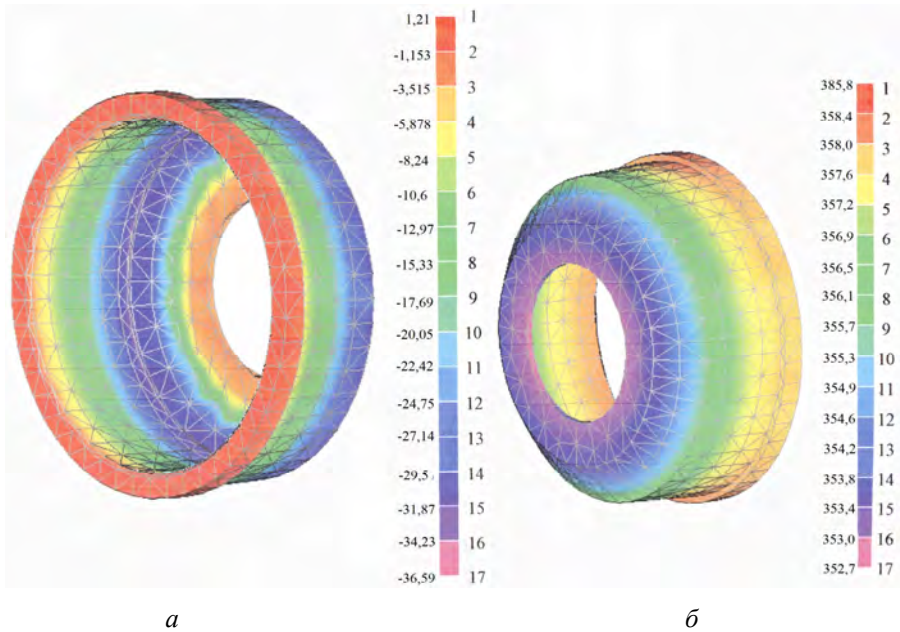


Рис. 12. Спектры температур внутренних поверхностей заднего тормозного барабана автомобилей семейства МАЗ при достижении его ободом стабилизационной температуры (*а*) и температурных градиентов (*б*)

Интервал изменения температур внутренних поверхностей элементов тормозного барабана составил от 352,7 до 358,8 °С, а их разность – 6,1 °С. При этом, интервал изменения температурных градиентов колебался от + 1,21 до – 36,59 °С/мм, а их разность составила – 35,38 °С/мм.

Температурный шаг между 5 и 6; 11 и 12; 16 и 17 порядковым номером цветного спектра элементов тормозного барабана составлял 0,3 °С, а во всех остальных случаях – 0,4 °С. Шаг температурных градиентов элементов тормозного барабана составил 2,36 °С/мм.

Термограммы внутренних поверхностей элементов заднего тормозного барабана транспортного средства семейства МАЗ отвечают нижнему диапазону стабилизационной температуры (рис. 12, *а*), а полученные расчетные значения температурных градиентов, в основном, отвечают ободу барабана (см. рис. 12, *б*) [6].

Перейдем к анализу энергонагруженности металлополимерных пар трения заднего барабанно-колодочного тормоза транспортного средства КрАЗ-250 при

екстремном ($\Delta V = 60$ км/ч) [а] и длительных торможениях ниже (б) и выше (в) допустимой температуры для материалов фрикционной накладки, которые иллюстрируются на рис. 13.

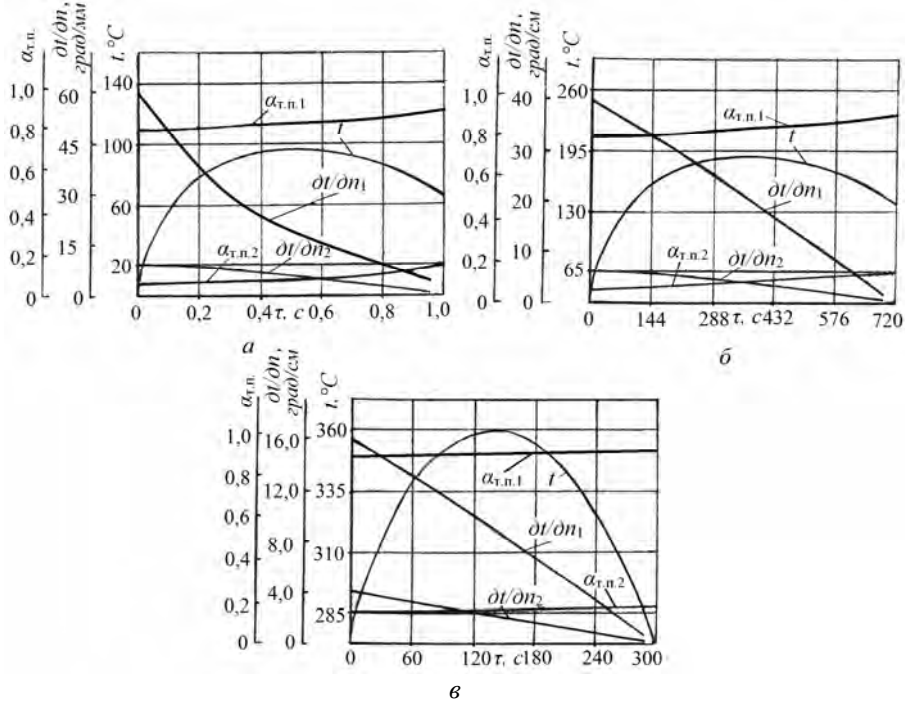


Рис. 13. Температурный режим металлополимерного узла трения заднего барабанно-колодочного тормоза транспортного средства КрАЗ-250 при экстремном ($\Delta V = 60$ км/ч) [а] и длительных торможениях ниже (б) и выше (в) допустимой температуры для материалов фрикционной накладки: $\alpha_{т.п.}$ – тепловой поток; t – температура поверхности трения; dt/dn – температурный градиент; τ – время торможения; (индексы «1» и «2» относятся к ободу тормозного барабана и фрикционной накладке)

На всех приведенных режимах нагружения металлополимерных пар трения заднего барабанно-колодочного тормоза транспортного средства реализуются следующие схемы взаимодействия: «металл-полимер» (I); «полимер-полимер» (II); «металл-«электролит»-«полимер»» (III); «металл-электролит» (IV). Схемы взаимодействия I-IV имеют различные структуры двойных электрических слоев, а следовательно, зарядных поверхностей и их разряда как при массопереносе частиц полимерной накладке на рабочую поверхность обода, так и при обратных процессах. Разряд между импульсно-взаимодействующими микровыступами (I-ой схеме) носит импульсный характер. Что касается пробоя полимерной пленки, которая односторонне металлизирована, благодаря тому, что по I-ой схеме сказалась на рабочей поверхности обода барабана то он происходит следующим образом. Пробой твердой полимерной пленки, обусловленный образованием жидкости, находящейся на поверхности полимерной накладке (происходит выгорание связующих компонентов при температуре выше допустимой для ее материалов), в электродной ее области объемного разряда, препятствующего разряду в полимерной пленке [7].

Рассмотрим графические зависимости, приведенные на рис. 13, а. Температура поверхности трения увеличивается до 0,6 с торможения, после чего плавно па-

дает. Градиент температуры обода барабана ($\partial t/\partial n_1$, °C/мм) до конца торможения уменьшается до 5,0 °C/мм, а градиент температуры поверхностного слоя полимерной накладки ($\partial t/\partial n_2$, °C/мм) – уменьшается до 1,0 °C/мм. При этом, коэффициенты распределения тепловых потоков к концу единичного торможения составили, соответственно, 0,9 и 0,1 для обода барабана и полимерной накладки.

Для длительного режима торможения (рис. 13, б) при работе фрикционной накладки при температуре ниже допустимой для ее материалов закономерности изменения температуры, градиентов температуры и коэффициентов распределения тепловых потоков не отличаются от характера протекания графических зависимостей на рис. 13, а. Различие состоит только в значениях исследуемых параметров, поскольку градиенты температур ($\partial t/\partial n_1$ и $\partial t/\partial n_2$) определялись по длине поверхности в один сантиметр.

Особый интерес представляет работа фрикционной накладки в зоне температур выше допустимой для ее материалов (см. рис. 13, в). Изменение поверхностной температуры уподоблено закономерности протекания плоской электромагнитной волны. Градиенты температуры ($\partial t/\partial n_1$ и $\partial t/\partial n_2$) существенно уменьшились, что также подтверждает рис. 13, в. При этом, значения коэффициентов распределения тепловых потоков $\alpha_{т.п.1}$ и $\alpha_{т.п.2}$ остаются квазипостоянными из-за высоких энергетических уровней поверхностного слоя полимерной накладки, вызванных наличием на ней островков электролита, имеющего большой электрохимический потенциал, который в состоянии блокировать энергетический уровень Ферми рабочей поверхности обода барабана. Такое состояние поверхности полимерной накладки вызывает инверсию тепловых потоков, направленных на стабилизацию теплового состояния обода тормозного барабана при минимальном температурном градиенте по его толщине.

Исходя из вышеизложенного для предотвращения термостабилизационного состояния обода тормозного барабана необходимо в процессе работы металлополимерных пар трения удалять с их поверхностей конденсат и влагу [9].

Выводы. Таким образом, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований представляется возможным сформулировать формулу открытия: установлены неизвестные ранее закономерности формирования энергетических уровней элементов металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии, заключающиеся в том, что при электротермическом сопротивлении различных типов контактов с неодинаковыми энергетическими уровнями за счет процессов электротермостимулированной поляризации и деполяризации возникают контурные цепи с множеством микро-конденсаторов и термобатарей с различной дискретной энергетической активностью характеризующейся динамическими, электрическими и тепловыми уровнями градиентов поверхностных и приповерхностных слоев рабочих поверхностей металлополимерных пар при их неустойчивом мета- и термостабильном состоянии.

Список литературы

1. Сесслер С. Электреты / С. Сесслер. – М.: Мир, 1983. – 481 с.
2. Пат. 2459986 С2 России, МПК F16D 65/82, 51/10. Способ определения составляющих электрических токов в парах трения «полимер-металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях (варианты)/ А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д.А. Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков; заявитель и

патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 26.02.2010; Оpubл. 27.08.2012, Бюл. №24.

3. Пат. 2462628 С2 России, МПК F16D 65/82, F16D 51/10. Способ определения направлений составляющих электрических токов в парах трения «полимер-металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях / А. И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 19.04.2010; Оpubл. 27.09.2012, Бюл. №27.

4. Джанахмедов А. Х. Триботехнические проблемы в нефтегазовом оборудовании / А. Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 1998. – 216 с.

5. Свереденок А. И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А. И. Свереденок, Н. К. Мишкин, Т. Ф. Колмыкова [и др.]// Минск: Наука и техника, 1987.–280 с.

6. Вольченко Д. А. Научные основы управления износотфрикционными свойствами металлополимерных пар трения тормозов для предотвращения термостабилизационного явления: дисс. ...докт. техн. наук: 05.02.04 / Вольченко Дмитрий Александрович. – Киев, 2012. – 424с. – На укр. яз.

7. Воробьев А. А. Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком 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.

8. Киндрачук М. В. Явление тепловой стабилизации в металлополимерных парах трения (диплом открытия №444)/ М. В. Киндрачук, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко. – Заявитель: Национальный авиационный университет (Украина). Приоритет открытия: 31 декабря 1970 г.

9. Пат. 2460913 С2 России, МПК F16D 65/833, 51/10. Барабанно-колодочный тормоз / А. И. Вольченко, В. М. Павливинский, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, Я. Б. Сторож, П. А. Поляков; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 21.06.2010; Оpubл. 10.09.2012, Бюл. №25.

Стаття надійшла до редакції 15.01.2013

*О. І. ВОЛЬЧЕНКО, М. С. КУЛИК, М. В. КИДРАЧУК,
Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, Н. О. ВОЛЬЧЕНКО, Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА*

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РІВНІВ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ

Проілюстрована роль поверхневих і приповерхневих шарів полімерних накладок у формуванні енергетичних рівнів металлополімерних пар тертя гальмівних пристроїв. Енергетичні рівні оцінювалися динамічним, електричним і температурними градієнтами нестійкого стану поверхонь металлополімерних пар тертя

Ключові слова: енергетичні рівні, полімерна накладка, пара тертя, гальмівні пристрої, градієнти температури.

*O. I. VOLCHENKO, M.S. KULIK, M.V. KINDRACHUK,
D.O. VOLCHENKO, N.O. VOLCHENKO, N.M. STEBELETSKA*

REGULARITIES OF FORMATION OF METAL-POLYMER FRICTION PAIRS ENERGY LEVELS

We've illustrated the role surface and subsurface layers of polymer linings in formation of energy levels of metal-polymer friction pairs of brake devices. Energy levels were evaluated by dynamic, electrical and temperature gradients of unstable condition metal-polymer friction pairs

Key words: energy levels, polymer lining, friction pair, brake devices, temperature gradients.

Вольченко Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры механики машин Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа.

Кулик Николай Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, ректор Национального авиационного университета.

Киндрачук Мирослав Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры машиноведения Национального авиационного университета.

Вольченко Дмитрий Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа.

Вольченко Николай Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и автосервиса факультета машиностроения и автосервиса Кубанского государственного технологического университета (Россия).

Стебелецкая Наталья Мироновна – аспирантка кафедры машиноведения Национального авиационного университета.