

**Криштопа С.И.**Ивано-Франковский национальный  
технический университет нефти и газа,  
г. Ивано - Франковск, Украина  
E-mail: retes@mail.ru**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТИ  
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ  
В СТЕНДОВЫХ УСЛОВИЯХ. ЧАСТЬ 2**

УДК 621.891

Для моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения в стендовых условиях предложены эквивалентные электрические схемы, имитирующие распределение тепловых потоков в их элементах при электромеханическом фрикционном взаимодействии, а также энергетические уровни поверхностных и подповерхностных слоев накладок при разомкнутом состоянии элементов трения.

**Ключевые слова:** микровыступы пар трения, пятно контакта, электрические и тепловые токи; термическое и электрическое сопротивление, электрическое моделирование, эквивалентные электрические схемы.

**Введение**

В первой части материалов публикации нашли отражение следующие вопросы:

- физическое подобие фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов;
- динамическое подобие подсистемы фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов;
- физическое подобие фрикционного взаимодействия "обод тормозного барабана - накладки колодок" барабанно-колодочного тормоза автомобиля.

Задача определения распределения тепловых потоков между парами трения при электротермомеханическом трении, а также определения остаточной энергонагруженности поверхностных и подповерхностных слоев полимерных накладок в паузах между торможениями требует применения электрического моделирования, исходя из аналогии дифференциальных уравнений теплопроводности и электропроводности.

**Цель работы** – разработка эквивалентных электрических схем, моделирующих распределение тепловых потоков в паре трения "металл - полимер" при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии, а также энергетические уровни поверхностных и подповерхностных слоев накладок при разомкнутом состоянии элементов трения.

**Постановка проблемы**

Механизм трибоэлектризации и формирования трибоЭДС при фрикционном взаимодействии полимерных композиционных материалов с механическими контртелами связан с изменением разности работ выхода электронно-ионной смеси из металла и полимера в условиях внешнего трения и, соответственно, с изменением величины трибоЭДС.

Исследованию контактного взаимодействия пар трения тормозных устройств (рис. 1, а, б) посвящена работа [1]. Пары трения работают в интервале температур ниже допустимой для материалов фрикционной накладки. При этом рассмотрено так называемое внешнее электрическое поле, которое возникает вследствие возникновения разности температур ( $t_1 - t_2$ ) и, как следствие, разности потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ). Таким образом, в зонах межконтактного взаимодействия с сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$  возникает термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) ( $e_t$ ).

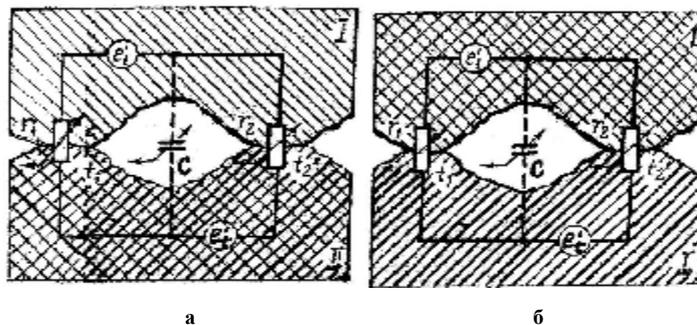


Рис. 1 – Контактное фрикционное взаимодействие микроучастков поверхностей трения:

а – барабанно - колодочного тормоза;

б – ленточно - колодочного тормоза;

I и II – металлический и полимерный элементы трения

В зазоре между парами трения расположен конденсатор с емкостью  $C$ , который способствует формированию разрядных токов во внешнем электрическом поле. При этом контактная разность потенциалов в паре трения в значительной степени зависит от работы выхода электронов из рабочей поверхности металлического элемента трения (обода шкива или барабана). Рассмотренные схемы электрических схем, в которых снизу (рис. 1, а) и сверху (рис. 1, б) прижимается полимерная накладка к металлическому фрикционному элементу. Особое внимание заслуживают исследования, выполненные А.Л. Жариным [2], касающиеся статических экспериментальных исследований нагруженности поверхностей тел: а – "гладкая - шероховатая"; б – "шероховатая - гладкая" (рис. 2, а, б).

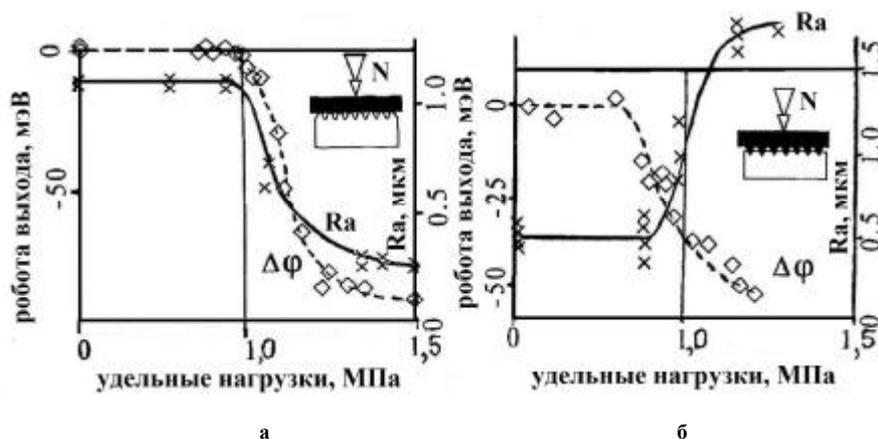


Рис. 2 – Статические экспериментальные исследования нагруженности поверхностей тел:  
а – "гладкая - шероховатая";  
б – "шероховатая - гладкая"

Из полученных графических зависимостей следует:

- в первом случае работа выхода электронов остается постоянной до удельного давления в 1,0 МПа, после чего резко увеличивается; что касается шероховатости микровыступов ( $R_a$ ), то их величина тоже остается постоянной до  $p = 1,0$  МПа, после чего резко падает;
- во втором случае работа выхода электронов остается постоянной величиной до  $p = 0,6$  МПа, после чего резко увеличивается до давления  $p = 1,2$  МПа; что касается шероховатости микровыступов ( $R_a$ ), то их величина тоже остается постоянной до  $p = 0,6$  МПа, после чего резко увеличивается. В данном исследовании классические законы трения не действуют.

Эффект дистанционного управления системой "металл - полимер - металл" [3] касается эффекта переключения в полимерной пленке, индуцированного в таких условиях, при которых область изменения внешнего воздействия (импульсной нормальной силы) и область изменения электропроводности в полимерной пленке пространственно разделены. Для исследований был выбран эффект переключения, индуцированный изменением граничных условий в системе "металл - полимер - металл", что привело к плавлению одного из электродов. В результате этого, вследствие резкого изменения эффективной работы выхода электронов металла вблизи критической температуры, происходит перераспределение поверхностного заряда в приконтактной области полимера. Таким образом, переход полимера в высокопроводящее состояние вызван изменением положения уровня Ферми металла (эффективной работы выхода электронов) в точке фазового перехода, то аналогичного результате можно достичь, если между металлом, претерпевающим фазовый переход, и полимерной пленкой поместить другой металл, стабильный в заданном интервале температур. В такой ситуации все структурно-механические изменения (изменение агрегатного состояния, стрикционные явления и т.п.) в первом металле могут быть конструктивно подавлены с помощью второго металла. Данный эффект представляется возможным использовать при оценке емкости и заряда конденсатора, образованного поверхностями разомкнутых пар трения.

### Моделирование распределения тепловых потоков

Тепловые и электрические процессы при внешнем трении играют решающую роль в изменении траектории пятен контактов микровыступов в процессах их разрушения. Как правило, при нагревании увеличивается интенсивность физико-химических процессов, явлений и эффектов, ухудшаются прочностные характеристики материалов в тонких поверхностных и подповерхностных слоях, т.е. стимулируются процессы, связанные с аккумуляцией и поглощением теплоты. Вынужденное охлаждение способствует процессам, при которых теплота выделяется. С точки зрения электронно-ионной теории на

пятнах контактов микровыступов наблюдаются процессы поляризации и деполяризации, изменяя при этом энергетические уровни поверхностных слоев металлополимерных пар трения. Исследования сложного комплекса связей процесса трения, в котором для конкретных условий устанавливается равновесная шероховатость с минимальным динамическим коэффициентом трения и интенсивностью изнашивания, т.е. определенное термодинамическое равновесие, целесообразно вести методами моделирования. Учитывая известную аналогию дифференциальных уравнений теплопроводности и электропроводности [4, 5], возможность воспроизводить нестационарные температурные поля при различных граничных условиях и различном характере распределения источников применяется электрическое моделирование.

Теплота генерируется в элементах фрикционных связей, принадлежащих телу I и II (рис. 3). Полагая, что генерация электрических и тепловых токов происходит вследствие деформации и адгезионного взаимодействия элементов фрикционной связи из различных материалов и с разными геометрическими параметрами, рассматривается задача распределения тепловых потоков при двух генераторах теплоты, разделенных некоторым электрическим и тепловым сопротивлением фрикционного контакта. Выражение для определения контактного, электрического и термического сопротивления фрикционных пар приводится в работах [6, 7].

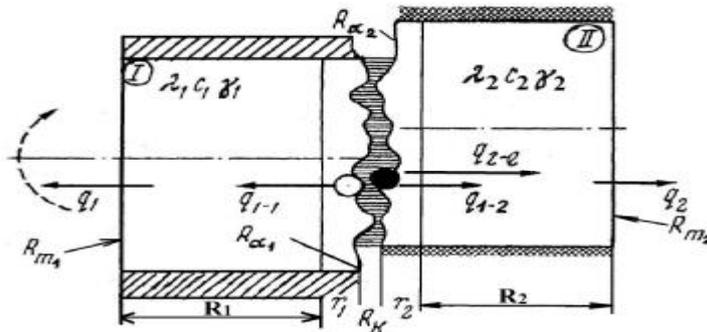


Рис. 3 – Фрикционные связи в паре трения «металл (I) – полимер (II)»:

$q$  – тепловые потоки;  $R_1, R_2$  – сопротивление элементов пары;  $R_{\alpha 1}, R_{\alpha 2}$  и  $R_{m1}, R_{m2}$  – теплоотдача от поверхностей трения и их торцов;  $r_1, r_2$  – радиусы микровыступов;  $\lambda, c, \gamma$  – коэффициенты теплопроводности, теплоемкость и плотность материалов

При электрическом моделировании распределения тепловых потоков в случае несимметричной задачи внешнего трения приняты следующие допущения: на номинальной поверхности трения тепловой поток распределен равномерно; рассматривается линейный тепловой поток; не учитывается теплоотдача от боковых поверхностей и излучение тел в окружающую среду. Модель схемы распределения тепловых потоков, представленную на рис. 4, можно преобразовать в эквивалентную модель (рис. 5).

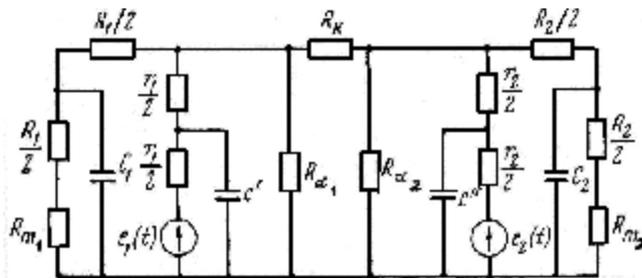


Рис. 4 – Электрическая схема, моделирующая распределение тепловых потоков в паре трения "металл - полимер":  
 $e(t)$  – источники напряжения (разности температур);  
 $c$  – конденсаторы

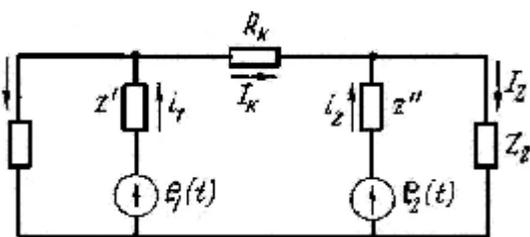


Рис. 5 – Эквивалентная электрическая схема, моделирующая распределение тепловых потоков в паре трения "металл - полимер":  
 $z$  – физико-механические свойства материалов;  
 $i$  – удельные тепловые потоки;  
 $I_k$  – дополнительный тепловой поток;  
 $I$  – рассеиваемые тепловые токи

Два источника напряжения  $e(t)$  (разности температур) представляют собой сумму элементов (локальных разностей температур), напряжение на которых не зависит от тока (удельного потока), проходящего через источник. Внутренние сопротивления источников  $z'$  и  $z''$  характеризуют внутренние параметры генераторов и определяют соотношение между мощностью, отводимой во внешнюю электрическую (тепловую) цепь, и мощностью, рассеиваемой в самом генераторе.

Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  являются неизменными для конкретной конструкции пары трения. Сопротивления  $R_{\alpha_1}$  и  $R_{\alpha_2}$ , характеризующие теплоотдачу от поверхности трения тела I и II, и  $R_{m_1}$ ,  $R_{m_2}$  – теплоотдачу от внешних торцов тел в окружающую среду, зависят от условий их обмывания средой, характеристик трения и для стационарных условий также являются неизменными.

Тепловые сопротивления  $R_k$ ,  $z'$  и  $z''$  определяются физико-механическими характеристиками материалов в тонком поверхностном и подповерхностных слоях и микрорельефом поверхностей трения. В процессе трения происходит постоянное разрушение микронеровностей с образованием новых и упрочнение разупрочнение материалов. Следовательно,  $R_k$ ,  $z'$  и  $z''$  в процессе трения могут меняться с определенной направленностью.

Распределение тепловых потоков в установившемся режиме трения и изнашивания относится к термодинамике равновесного состояния. Из второго закона термодинамики следует, что термодинамический необратимый процесс происходящим течением направлен в сторону максимума энтропии. С физической точки зрения представляется возможным рассматривать трение как процесс удовлетворяющий принципу минимальных необратимых сил, т.е. для устойчивых систем должна быть максимальная скорость работы диссипации, отвечающая максимальной скорости порождения энтропии [8]. При частичной самооптимизации процесса трения он должен оптимизироваться в том же направлении.

В начале процесса трения, когда два тела (системы) взаимодействуют, температура  $\beta = 1/kT$  (где  $k$  – постоянная Больцмана) и потенциал Планка  $\alpha_c$  (мера стремления электронов и ионов покинуть области, в которых они находятся) для первой системы отличаются от тех же величин для второй системы. Поэтому происходит подстройка распределений энергии, состава и экстенсивных характеристик поверхностных и подповерхностных слоев (массы, объема, энтропии) с тем, чтобы энтропия достигла максимума, при котором  $\beta_1 = \beta_2$ ,  $\alpha_{c_1} = \alpha_{c_2}$  [9]. На электрической модели это условие приводит к тому, что поток, проходящий через сопротивление нейтрального фрикционного контакта, будет равен нулю.

Отношение электрических токов или рассеиваемых тепловых токов можно записать:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{i_1 - I_k}{i_2 + I_k}. \quad (1)$$

Величина генерируемых удельных тепловых потоков определяется в виде:

$$i_1 = \varepsilon f N v, \quad i_2 = (1 - \varepsilon) f N v, \quad (2)$$

где  $f$  – динамический коэффициент трения;

$v$  – скорость скольжения;

$N$  – импульсная нормальная нагрузка;

$\varepsilon = \varepsilon(\Gamma_1, \Gamma_2, R_{\alpha_1}, R_{\alpha_2})$  – коэффициент распределения тепловых потоков между трущимися телами [7] в функции постоянных упругости и среднеарифметических отклонений профиля шероховатостей.

Дополнительный обменный тепловой поток находим по формуле:

$$I_k = \frac{i_1 Z_1 - i_2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + R_k}. \quad (3)$$

Подставив выражения (2), (3) в (1) и производя некоторые преобразования, получим:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} = \frac{Z_2 + \varepsilon R_k}{Z_1 + (1 - \varepsilon) R_k}.$$

Выражение (3) показывает, что  $I_k = 0$ , если:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (4)$$

Если выполняется условие (4), то отсутствует дополнительный обменный тепловой поток, вызванный электрическим током, через контакт ( $I_k = 0$ ), а генерируемые электрические токи  $i_1$  и  $i_2$  равны тепловым потокам в нагрузках  $I_1$  и  $I_2$ , соответственно, т.е.:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (5)$$

Таким образом, условием отсутствия температурного скачка при внешнем трении является пропорциональность генерируемых удельных тепловых потоков тел и их полных тепловых проводимостей, что соответствует определенному отношению равновесных шероховатостей пары трения (например, "полимер - металл") в квазистационарных условиях.

Заметим, что при моделировании распределения тепловых потоков двух полуограниченных тел, имеющих тепловую изоляцию с боковых сторон, за сопротивление  $Z$  необходимо брать сопротивление однородной линии с распределенными параметрами  $R \sim 1/\lambda$  и  $C \sim c\gamma$ . Величина его определяется в виде [3]  $Z_B = \sqrt{R/j\omega C}$ . Тогда отношение тепловых потоков, определяемое по формуле (5), запишем следующим образом:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Z_{B_2}}{Z_{B_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \gamma_1}{\lambda_2 c_2 \gamma_2}}.$$

Полученное выражение совпадает с формулой Ф. Шаррона, которой часто пользуются для квазистационарных условий трения, когда  $K_{B_3} \approx 1$ .

При отсутствии обменного теплового потока между трущимися поверхностями каждый из источников со своей нагрузкой можно рассматривать как самостоятельную термодинамическую систему, максимум скорости порождения энтропии которой также достигается при максимальном рассеивании мощности. На электрической модели передача максимума мощности и нагрузки достигается при равенстве полных сопротивлений нагрузки источника [8], т.е.:

$$Z_1 = z', \quad Z_2 = z'' \quad (6)$$

Физическую картину этого явления при трении вероятно можно объяснить так. На пятнах контактов микровыступов формируется топография микрогеометрии с различным типом контактов (омический, блокирующий и нейтральный). Однако за счет естественного отбора для каждого из условий трения устанавливаются и воспроизводятся типы контактов, как обеспечивающие максимальную передачу внутренней энергии от поверхности трения в глубину тела, максимум энтропии и ее скорости прохождения (выполнение условий (5) и (6), так и остающейся внутренней энергии во втором теле, что и способствует возникновению состояния термодинамического равновесия.

В этом случае изменение физико-механических свойств и микрогеометрия в соответствии с принципом Ле-Шателье должно быть направлено на увеличение теплового сопротивления материалов в тонких слоях, подвергающихся активной деформации. Анализ возможных изменений величины внутреннего сопротивления показывает, что для разных материалов и конструкций пар трения за счет коэффициента теплопроводности и изменения шероховатости достижения равенств сопротивлений (6) невозможны.

Проведем рассуждения в несколько другом плане. Представим, что известны термическое и электрическое сопротивление между телами, проводящими через поверхностные шероховатости. Проводимость единичной круговой площадки равна  $2Ka$ , где  $K$  – объемная проводимость;  $a$  – размер зоны контакта. Общая проводимость границы раздела равна, следовательно,  $2K \sum a = 2Kn\bar{a}$ , где  $n$  – число пятен контактов микровыступов тел;  $\bar{a}$  – средний размер зоны контакта. Последний сохраняется приблизительно постоянным, в то время как число пятен  $n$  возрастает пропорционально нагрузке, тем самым подтверждая, что суммарная проводимость возрастает пропорционально нагрузке. Законы трения требуют, чтобы общая площадь контакта  $(\sum a^2)$  возрастала пропорционально номинальным контактными удельным нагрузкам; эксперименты по определению проводимости требуют, чтобы  $\sum a$  возрастала пропорционально нагрузке. Есть только один простой путь, чтобы оба этих условия были выполнены одновременно при так называемом принципе суперпозиции – средний контактный размер  $\bar{a}$  должен сохраняться постоянным, а число пятен действительного контакта  $n$  должно возрастать пропорционально нагрузке.

Образование вторичных структур на поверхности трения, например, окислов, сульфидов с малым коэффициентом теплопроводности, позволяет обеспечить выполнение условий (6) и выйти системам на максимум скорости порождения энтропии.

Полученные выражения (5), (6) позволяют объяснить явление оптимизации микрорельефа поверхностей трения, следствием которого и наблюдается постоянство микрорельефа приработанных поверхностей, а также зависимость его параметров от условий трения (характеристик трения, теплоотдачи от поверхности трения и теплопередачи через тела трения).

Однако моделировать необходимо не только распределение тепловых потоков между телами при электротермомеханическом трении, но и оценивать энергетический баланс рабочих поверхностей в ин-

тервалах времени между торможениями, поскольку его уровень накладывает отпечаток на последующие торможения. На рис. 6 проиллюстрирована эквивалентная электрическая схема поверхностного и подповерхностных слоев полимерной накладки.

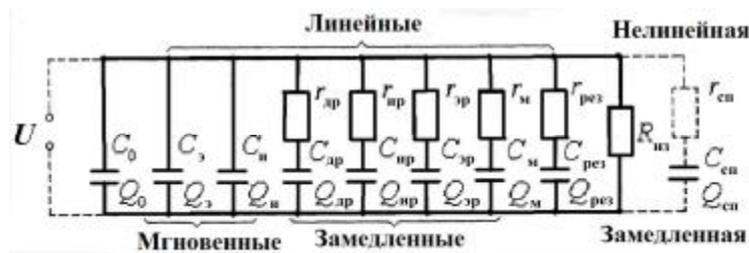


Рис. 6 – Эквивалентная электрическая схема поверхностного и подповерхностного слоев полимерной накладки:  $U$  – напряжение в цепи;  $C_0, Q_0$  – емкость и заряд собственного поля между микровыступами;  $C_1, Q_1; C_2, Q_2; C_{ар}, Q_{ар}; C_{ир}, Q_{ир}; C_{эр}, Q_{эр}; C_m, Q_m; C_{рез}, Q_{рез}; C_{сп}, Q_{сп}$  – соответственно емкости и заряды, отвечающие различным механизмам поляризации: электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной, резонансной и спонтанной;  $r$  – сопротивления, эквивалентные потерям энергии при указанных механизмах поляризации;  $R_{ш}$  – шунтированное сопротивление изоляции

Значение емкости конденсатора в полимерной накладке и накопленных в ней электрических зарядов обусловлены многообразием механизма поляризации, которые различны у разных накладок и могут иметь место одновременно у одной и той же накладки.

Эквивалентную схему для поверхностных и подповерхностных слоев полимерной накладки, в которых наблюдаются различные механизмы поляризации, можно представить в виде ряда подключенных параллельно к источнику напряжения  $U$  (разность потенциалов между разомкнутыми поверхностями тел) конденсаторов (образованных боковыми поверхностями микровыступов поверхностного слоя накладки), как показано на рис. 6. При этом емкости конденсаторов, приведенной эквивалентной электрической схемы, шунтированы сопротивлением  $R_{ш}$ , представляющим собой сопротивление тела накладки току сквозной электропроводности.

Закономерная зависимость распределения тепловых потоков от тепловых сопротивлений, физико-механических свойств и параметров микрорельефа поверхностей трения будет раскрыта в специально поставленных экспериментах, результаты которых найдут отражение в третьей части публикации.

## Выводы

Таким образом, предложенные эквивалентные электрические схемы, позволяющие реализовать электрическое моделирование энергонагруженности металлополимерных пар трения барабанно-колодочных тормозов автомобилей не только в периоды электротермомеханического трения, но и в периоды пауз между торможениями.

## Литература

1. Свереденюк А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свереденюк, Н.К. Мишкин, Т.Ф. Калмыкова [и др.] // Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
2. Жарин А.Л. Кинетические и физико-химические процессы в тонких поверхностных слоях металлов и сплавов при трении скольжения: дисс....докт. техн. наук: 05.02.04 / Жарин Анатолий Леонидович. – Минск, 1994. – 366 с.
3. Колесников В.И. теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В.И. Колесников. – М.: Наука, 2003. – 279 с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
5. Основы трибологии / Под ред. Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
6. Шлыков Ю.П. Контактное термическое сопротивление / Ю.П. Шлыков, Е.А. Ганин, С.Н. Царевский. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
7. Измайлов В.В. Контакт твердых тел и его проводимость / В.В. Измайлов, М.В. Новоселов. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2010. – 112 с.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 508 с.

Поступила в редакцию 22.04.2014

**Kryshypa S.I. Design of the Power Loading of Metallic Polymer Friction Pairs at Stand Conditions. Part 2.**

At heating of pairs of friction strong descriptions of materials get worse in thin superficial and subsuperficial layers and the processes related to accumulation and absorption of warmth are intensified. From point of electronic-ionic theory there are the processes of polarization and depolarization on the spots of contacts of micro ledges here the power levels of superficial layers of metal polymer pairs of friction change and an equilibrium roughness with the minimum dynamic coefficient of friction and intensity of wear is set, so certain thermodynamics equilibrium. It is expedient to conduct researches of such difficult complex of communications of process of friction by the methods of design. Taking into account the known analogy of differential equalizations of heat conductivity and conductivity, possibility to reproduce the unstationary temperature fields at different scope terms and different character of distributing of sources the electric design is used. For the design of energy loading of metal polymer pairs of friction equivalent electric charts, imitating distributing of thermal streams in their elements at electro mechanic friction co-operation and also power levels of superficial and subsuperficial layers of protective straps, at a secret is broken being of elements of friction are offered in stand terms.

**Key words:** micro ledges of pairs of friction, spot of contact, electric and thermal currents; thermal and electric resistance, electric design, equivalent electric charts.

**References**

1. Sveredenyuk A.I., Mishkin N.K., Kalmikova T.F. [and other]. Acoustic and electric methods in trybotechnique.. Minsk: Science and technique, 1987. 280 p.
2. Garin A.L. Kinetic and physical and chemical processes in the thin superficial layers of metals and alloys at friction of sliding: diss..dokt. tehn. sciences: 05.02.04. Garin Anatoliy Leonid. Minsk, 1994. 366 p.
3. Kolesnikov V.I. Warmphysics processes in metal polymer trybosystem. M.: Science, 2003. 279 p.
4. Kragelskiy I.V. Friction and wear. M.: Mashinostroenie, 1986. 480 p.
5. Bases of trybology. Under red. Chichinadze A.V. M.: Mashinostroenie, 2001. 664 p.
6. Shlikov Yu.P., Ganin E.A., Tsarevskiy S.N. Contact thermal resistance. M.: Energy, 1977. 328 p.
7. Izmaylov V.V., Novoselov M.V. Contact of solids and its conductivity. Tver: publishing house TGTU, 2010. 112 p.
8. Dgonson K. Mechanic contact co-operation/ To. Dgonson. M.: Mir, 1989. 508 p.