

УДК 621.891

UDC 621.891

САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ (ЧАСТЬ 1)

SELF-REGULATION AND INTERNAL AND EXTERNAL PARAMETERS IN METAL BAND FRICTION PAIRS-SHOE BRAKES (PART 1)

Вольченко Николай Александрович
к.т.н., доцент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2

Volchenko Nikolai Aleksandrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Kuban State Technological university, Krasnodar, Russia
350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya, 2

Красин Петр Сергеевич
аспирант
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2
e-mail peter.krasin@mail.ru

Krasin Peter Sergeevich
postgraduate student
Kuban State Technological university, Krasnodar, Russia
350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya, 2
e-mail peter.krasin@mail.ru

Проиллюстрированы саморегулирование (на основе работы выхода электронов из металлического фрикционного элемента) и регулирование квазипостоянными удельными нагрузками на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза для оценки процессов их нормального износа

We've illustrated self-regulation (based on the work function of the metal friction element) and the regulation by quasiconstant unit loads on the contact patch of micropoints of metal-polymer friction pairs of band-block brake for the evaluation of process of their normal wear

Ключевые слова: ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫЙ ТОРМОЗ, МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНАЯ ПАРА ТРЕНИЯ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ФРИКЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ, РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ, САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ, ВНУТРЕННИЕ И ВНЕШНИЕ ПАРАМЕТРЫ, РАЗРУШЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ ПЛЕНОК

Keywords: BAND-BLOCK BRAKE, METAL-POLYMER FRICTION PAIR, METALLIC FRICTION ELEMENT, WORK FUNCTION, SELF-REGULATION AND REGULATION, INTERNAL AND EXTERNAL PARAMETERS, DESTRUCTION AND FORMATION OF PELLICLE

Введение. Разработка методов мониторинга процессов, явлений и эффектов, протекающих как внутри металлополимерных пар трения, так и на пятнах контактов их микровыступов. При этом необходимо установить информационные каналы и идентифицированные внутренние и внешние параметры состояния фрикционных материалов и их пятен контактов, позволяющие осуществлять мониторинг процессов, явлений и эффектов. Однако сделать это оказывается не так просто, поскольку внутренние параметры материалов пар трения являются неконтролируемыми, т.е. саморегулируемыми, а внешние параметры – регулируемыми. В качестве первого параметра выступает работа выхода электронов из металлического фрик-

ционного элемента, а второй параметр – удельные нагрузки, возникающие в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза при взаимодействии их пятен контактов микровыступов. Как отмечают исследователи в работах [1–6], каждое из пятен контактов имеет свое поле (механическое, электрическое, электромагнитное, тепловое и химическое, а также их комбинаций). Все они не в одинаковой степени влияют на энергетические уровни типов контактов металлополимерных пар трения из-за того, что их основные и дополнительные поверхности омываются скоростными токами компонентами омывающих сред.

Целью настоящей работы является разработка метода мониторинга процессов, явлений и эффектов, наблюдаемых как в материалах пар трения, так и на пятнах контактов их микровыступов с позиций саморегулирования и регулирования для оценки процессов нормального износа.

Физические модели саморегулирования внутренних параметров. Прежде чем перейти к саморегулированию внешних параметров, рассмотрим саморегулирование внутренних параметров при контактном взаимодействии микровыступов пар трения «металл – полимер».

Работа выхода электронов с металлических фрикционных элементов влияет на величину и направление термотоков, которые генерируются на поверхности пар трения тормозных устройств.

Рассматриваемый метод определения работы выхода электронов базируется на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, который покидает рабочую поверхность металлического фрикционного элемента выносит с собой энергию, доля которой составляет работу выхода электрона W . При нагревании металлического фрикционного элемента тормоза во время торможения до температуры достаточной для термоэлектронной эмиссии вблизи его поверхности образуется так называемая электронная туча (пространственный заряд). В случае разомкнутой пары трения тормоза устанавливается равенство числа электронов, которые покидают рабо-

чую поверхность металлического фрикционного элемента и числа электронов, которые возвращаются на нее с области пространственного заряда [3, 5]. При замыкании пар трения тормоза (предварительно нагретых) возникает движение электронов от рабочей поверхности металлического к неметаллическому (полимерному) фрикционному элементу. В результате чего происходит снижение поверхностной температуры рабочей поверхности металлического фрикционного элемента, связанное с указанным переносом энергии каждым электроном.

Известно, что зависимость плотности тока от абсолютной температуры металлического фрикционного элемента описывается зависимостью Ричардсона – Дэшмана [5]:

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

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

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

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

Полученное равенство представим для двух тепловых состояний металлического фрикционного элемента, т.е. до (T_1) и после (T_2) процесса торможения.

При этом учитываем, что $\ln e = 1$ и $j = \frac{I}{A}$,

де I – ток, который генерируется в паре трения на микроучастке площадью A , в результате чего имеем следующие зависимости:

$$\ln \frac{I_1}{AT_1^2} = \ln C - \frac{W}{kT_1} \quad \ln \frac{I_2}{AT_2^2} = \ln C - \frac{W}{kT_2}$$

$$; (2) \quad . (3)$$

Разность между второй (2) и первой (3) зависимостью позволила получить

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

которая превращается в расчетную зависимость для определения работы выхода электрона с металлического фрикционного элемента

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

Таким образом, работа выхода электронов (4) устанавливает связь между токами, которые генерируются на рабочих поверхностях пар трения тормоза и поверхностными температурами которые они вызывают на них.

Рассмотрим контактное явление в случае пары трения «металл-полимер», разделенных тонким вакуумным зазором, при температуре фрикционных материалов полимера ниже допустимой (рис. 1 а). Контактная разность потенциалов (ϕ) определяется как разность между электрическим потенциалом (уровнем Ферми) E_ϕ металла (M_2) и полимерным материалом (P_1). На рис. 1а поверхностный потенциальный барьер показан пунктирной линией, а уровни Ферми «металл – полимер» – сплошными горизонтальными линиями. Представленная схема отвечает начальному моменту, когда металл и полимер расположены на расстоянии d при котором возможный эффективный обмен электронами и ионами.

Согласно рис. 1а при условии если $\phi_2 > \phi_1$, то $j_2 > j_1$, и будет совершаться перенос электронов слева направо. При этом поверхность металла заряжена отрицательно, а полимера – положительно. В зазоре возникает внешнее электрическое поле $E_K^{(вн)}$ и соответствующая разность потенциалов $j_1 = j_2$. В этом случае условием равновесия является равенство уровней Ферми.

При этом токи выравниваются, т.е. $(\varphi_2^{(вн)} - \varphi_1) = eU_K$ (рис. 1 б). Данное равенство означает, что потенциальный барьер для электронов, которые движутся слева

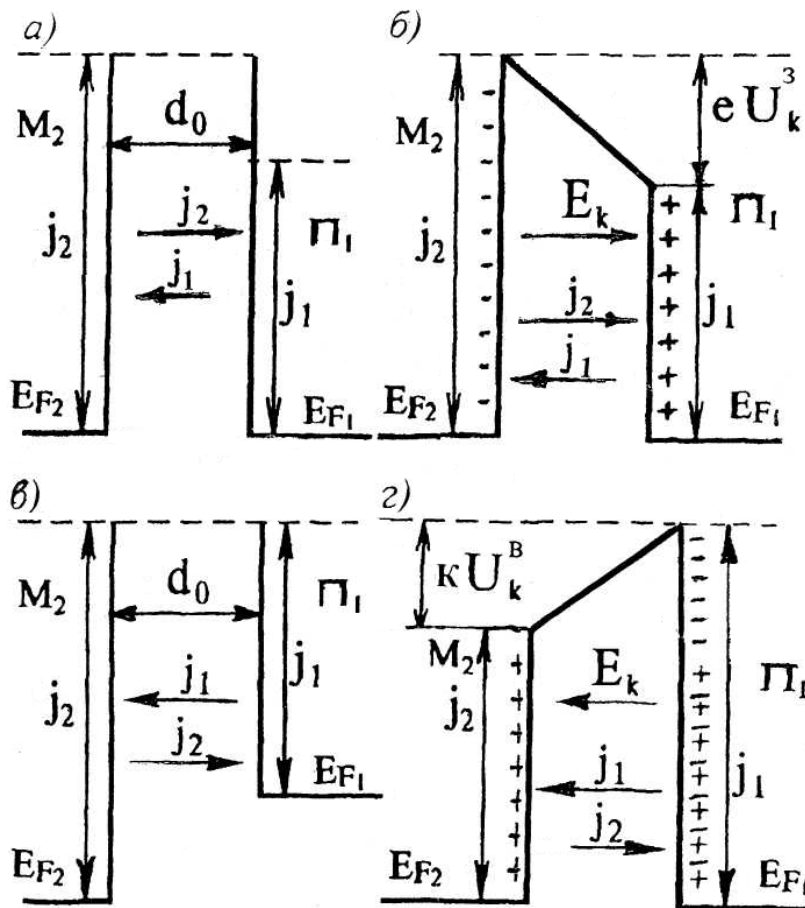


Рисунок 1 а, б, в, г Контактные явления в паре трения «металл (M_2) – полимер (Π_1)» при работе накладки ниже (а) и выше (б) допустимой температуры для ее фрикционных материалов и в случае установления равновесия (б, г)

направо, т.е. $\varphi_2 + eU_K^{(вн)}$, должны быть равным потенциальному барьеру для ионов, которые движутся справа налево, т.е. φ_1 . Другими словами справедливо равенство

$$\varphi_2 + eU_K^{(вн)} = \varphi_1, \tag{5}$$

Таким образом, после установления равновесия возникает контактная разность потенциалов.

$$U_K^{(вн)} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e}, \quad (6)$$

Более сложным является случай, когда рассматривается пара трения «металл – полимер» разделенной тонким вакуумным зазором, при температуре фрикционных материалов полимера выше допустимой (рис. 1, в). В этом случае поверхностный потенциальный барьер (показан пунктирной линией) является одинаковым ($j_2 = j_1$) в связи с тем, что фрикционный материал полимера достиг допустимой температуры и начались деструктивные процессы в его приповерхностных слоях. Последние и привели к образованию в них жидкостных островков.

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

$$\varphi_1 + ku_k^{(вт)} = \varphi_2. \quad (7)$$

После установления равновесия возникает контактная разница потенциалов:

$$u_k^{(вт)} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{k}. \quad (8)$$

Таким образом, на основании вышеизложенного представляется возможным перейти к рассмотрению регулирования внешних параметров металлополимерных пар трения тормозных устройств.

Физические модели регулирования внешних параметров. Противоречивые данные в отечественной и зарубежной литературе по вопросу определения динамических параметров пар трения ленточно-колодочных тормозов [1, 2, 3, 4] заставляют многих исследователей искать методы их уточнения и усовершенствования. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования уровня эксплуатационных параметров ленточно-колодочных тормозов позволили свести их в четыре группы.

В ленточно-колодочных тормозах буровой лебедки при квазилинейном законе изменения частоты вращения тормозного шкива от установившегося значения до нуля при спуске загруженного элеватора определение его эксплуатационных параметров, сведенных в первую группу, выполняют в следующей последовательности: оценивают режим вращения тормозного шкива; определяют: время торможения; натяжение набегающей ветви тормозной ленты; максимальные и минимальные удельные нагрузки в парах трения; тормозной момент, который развивают фрикционные узлы, коэффициент запаса тормозного момента; энергоемкость фрикционных узлов, коэффициент полезного действия тормоза. Значение эксплуатационных параметров, которые включены во вторую группу, определяют в следующей последовательности: коэффициент запаса прочности для сечения тормозной ленты; деформации тормозной ленты при размещении на дуге ее охвата фрикционных накладок с переменным и постоянным шагом; радиальные деформации накладки; оценивают общую деформацию элементов тормозной системы. Определение эксплуатационных параметров, составляющих третью группу, выполняют в следующей последовательности: теплота, температуры и их распределение по толщине обода шкива при квазилинейном закономерности изменения удельных нагрузок во фрикционных узлах тормоза; интенсивность тепловыделения от поверхностей шкива; коэффициенты распределения тепловых потоков между парами трения тормоза. Вычисление проводят при квазилинейных законах из-

менения: частоты вращения тормозного шкива от установившегося значения до нуля; деформаций тормозной ленты и количества генерируемой, аккумулированной и рассеиваемой теплоты от фрикционных узлов при спуске элеватора. Закономерность износа рабочих поверхностей фрикционных накладок (четвертая группа) аналогична закономерности изменения удельных нагрузок в парах трения тормоза (систематизация эксплуатационных параметров и закономерности их изменения защищены положительным решением на выдачу патента на изобретение России по заявке №2010145348/11 от 05.04.2013г.). Аналогичным образом можно свести в группы и эксплуатационные параметры фрикционных узлов барабанно-колодочных тормозов транспортных средств. Все вышерассмотренные эксплуатационные параметры относятся к внешним параметрам.

Явление саморегулирования процессов разрушения и восстановления вторичных структур на площадях контактов микровыступов металлополимерных пар трения тормозных устройств выявлены с помощью механически, физических и химических полей, находящихся под воздействием термодинамической системы трения (начиная с момента окончания приработки – после периода релаксации) поддерживать сколь угодно долго стационарность всех сопутствующих ее параметров.

При этом явления стационарности на механических, физических и химических полях и их комбинаций были установлены за счет поверхностных и объемных градиентов с учетом субмикрорельефов взаимодействующих пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения и физико-химической их активности.

В результате исследования механизма нормального износа микровыступов пар трения и условий возникновения их повреждаемости установлены следующие основные допущения нормального износа. Динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления вторичных структур при неизменных внутренних параметрах материалов пары трения и незна-

чительном колебании поверхностных и объемных градиентов, возникающих полей на пятнах контактов, реализуются при условии $V_p''=V_e''$, где V_p'' , V_e'' – скорости: разрушения и восстановления вторичных структур.

Метастабильное состояние пятен контактов микровыступов поверхностей трения, как следствие динамического равновесия достигается при условии, когда $A_{nl}=const$, где A_{nl} – суммарная площадь пятен контактов микровыступов поверхностей трения, покрытая пленкой вторичных структур при квазипостоянных градиентах.

Устойчивость динамического равновесия ($V_p''=V_e''$) в некотором диапазоне параметров трения материалов при воздействии механических, физических и химических токов, находящихся в токах омывающей среды, достигается в случае, когда импульсные градиенты нормального усилия и поверхностной температуры являются фиксированными величинами и не превышают их допустимых границ, и могут сопровождаться определенное время переходными процессами.

Приведенные закономерности, подтвержденные экспериментальными данными, позволили прийти к заключению о наличии явления саморегулирования при износе микровыступов металлополимерного фрикционного элемента.

Для изучения и анализа механизма саморегулирования процессов разрушения и восстановления вторичных структур пятен контактов металлического фрикционного элемента разработана структурная схема для создания в дальнейшем физической модели нормального износа.

Процессы, происходящие в тончайших поверхностных слоях металлического фрикционного элемента, условно разделяем на три стадии: 1 – деформирование и активация; 2 – образование вторичных структур; 3 – разрушение вторичных структур.

Работа фрикционных связей вызывает пластическое деформирование тонких слоев металла. В то же время плотность несовершенств достигает

величин насыщений. Термодинамическое неустойчивое состояние рабочего слоя металла в процессе деформирования вызывает его резкую активацию за счет имеющихся в зоне пятен контактов микровыступов омывающих их активных компонентов токов среды (в частности, кислорода), что приводит к их физико-химическому взаимодействию – образованию вторичных структур. В результате импульсного многократного нагружения (механического, электрического и теплового) и наличия внутренних напряжений в пленке вторичных структур происходит зарождение, образование и развитие микротрещин, а на поверхности раздела пленки и основного металла за счет действия переменного трибоэффекта – ослабление фрикционных связей, разрыв и отслаивание пленок переменного сечения. Последующие механические воздействия приводят к разрушению и износу пленок. На ювенильных (обнаженных) участках поверхностей процессы повторяются. Наличие импульсной неравномерности нагружения, а также неоднородности характеристик пленок на поверхности пятен контактов микровыступов позволяет одновременно присутствовать всем трем стадиям описанных процессов.

Представленная физическая модель описывается структурной схемой, показанной на рис. 2, а. В результате механического, физического и химического воздействия на площадки контактов микровыступов, омываемых токами среды при наличии активной среды (в частности, кислорода) поверхности контактов покрываются пленками. При этом под действием механических, электрических и тепловых воздействий [вектор N , t (τ)] часть пленок разрушается.

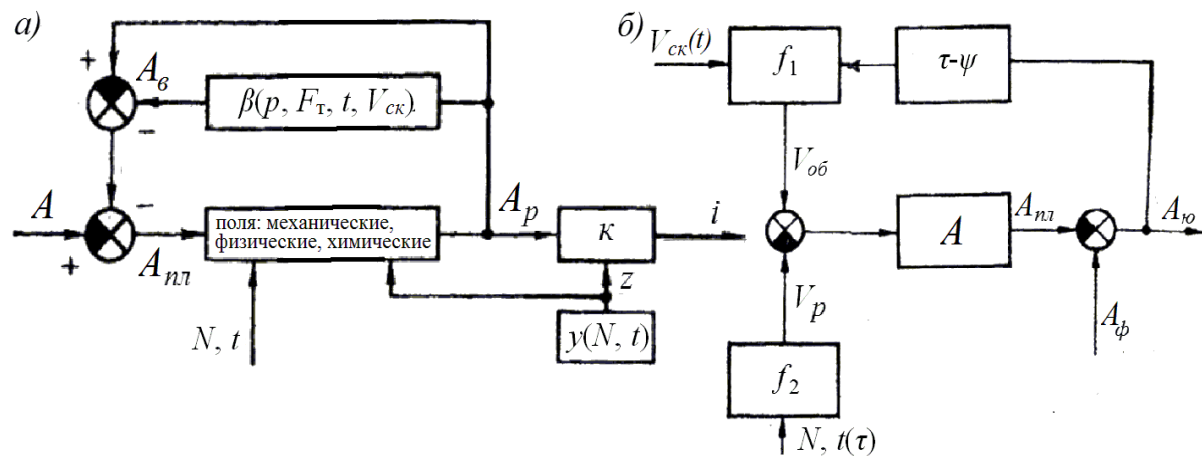


Рисунок 2 а, б. Структурная схема саморегулирования процессов при изнашивании рабочего слоя металлического фрикционного элемента (а) и его взаимодействия с омывающими токами среды в зоне трения (б):

A и A_ϕ , A_{nl} – площади: общая и фактического контакта; покрытая пленкой; A_p – часть A_{nl} , подвергающаяся разрушению; $A_{ю}$ – площадь ювенильных участков на поверхности фактического контакта, образующихся в результате разрушения и уноса пленок; A_ϵ – часть ювенильной поверхности, на которой произошло восстановление пленки; z – толщина пленки; $i = kzA_p$ – скорость износа пленки; k – коэффициент пропорциональности; ϵ – рассогласование, равное площади обнаженной поверхности в каждый момент времени, т. е. $\epsilon = A_p - A_\epsilon$; $N, t(\tau)$ – обобщенные параметры импульсной нормальной нагрузки и поверхностной температуры; F_m – сила трения; $V_{ck}, V_p, V_{об}$ – скорости: скольжения, разрушения и образования пленок (соответственно, уменьшение и увеличение их площади в единицу времени); f_1, f_2 – функции, выражающие зависимости скоростей образования и разрушения пленок вторичных структур в соответствующих полях взаимодействия; ψ – время между импульсами разрушения и уноса пленок (образования ювенильных участков) и возникновения новых пленок на этих участках

Термодинамически устойчивым является состояние, когда все поверхности контактов покрыты пленкой, поэтому $\epsilon \rightarrow 0$. Но вследствие задержки в восстановлении пленок выполняется только условие $\epsilon = \epsilon_0 > 0$, что отвечает динамическому равновесию процессов разрушения и восстановления пленок вторичных структур. Толщина разрушаемых пленок является функцией вектора N, t [блок $y(N, t)$].

Структурной схеме соответствует следующая система уравнений:

$$A_{nl} = A - \epsilon; \quad \epsilon = A_p - A_\epsilon; \quad A_p = \alpha_1[N, t(\tau), z]A_{nl}; \quad A_\epsilon = \beta(p, F_\tau, t, V_{ck})A_p;$$

$$i = kzA_p; \quad z = y(N, t), \quad \text{где } \alpha_1[N, t(\tau), z] = \alpha[N, t(\tau), z(N, t)].$$

Поэтому можно записать

$$i = \frac{kAp(N, t; \bar{M}; \bar{C})\alpha_1(N, t; \bar{M}; \bar{C})}{1 + \alpha_1(N, t; \bar{M}; \bar{C})[1 - \beta(V_{ck}; \bar{M}; \bar{C})]} \quad (9)$$

В зависимости (9) участвуют в явном виде вектора M и C , компонентами которых являются параметры фрикционных материалов и токов омывающих сред. Учет данных параметров позволяет получить закономерности для расчета нормального износа в зависимости от материалов, токов нагружения и омывающих сред.

Для описания кинетических закономерностей явлений структурной приспособляемости процессов электротермомеханического трения и износа при переменных воздействиях механического, физического и химического характера разработана динамическая модель саморегулирования (рис. 2 б). Параметр ψ на рис. 2 б характеризуется, главным образом, проникающей способностью токов омывающей среды и ее скоростью физико-химического воздействия на ювенильную поверхность контактов микровыступов. Предложенной физической модели отвечают следующие уравнения

$$\frac{dA_{nl}}{d\tau} = V_{ob}(\tau) - V_p(\tau) - V_e(\tau); A_{ю}(\tau) = A_{\phi} - A_{nl}, \quad (10)$$

где $V_{ob}(\tau) = f_1[V_{ck}(\tau), A_{ю}(\tau - \psi)]$; $V_p(\tau) = f_2[N, t(\tau)]$.

Скорость образования пленок пропорциональна скорости скольжения и площади контактов микровыступов, на которых возможно их образование и поэтому может быть представлена в виде $V_{ob} = kW(\tau)A_{ю}(\tau - \psi)$, где k – коэффициент интенсивности образования пленок. Учитывая независимость механических воздействий – удельной нагрузки и скорости скольжения – можно записать, что $V_p [N, t(\tau)] = a_1[V_{ck}(\tau)] + a_2p(\tau)$, где a_1 и a_2 – коэффициенты, зависящие от прочности пленок.

Таким образом, процессы образования и разрушения вторичных структур описываются дифференциальным уравнением первого порядка с запаздывающим аргументом

$$\frac{dA_{nl}}{d\tau} + kV_{ск}(\tau)A_{nl}(\tau - \psi) = V_{ск}(\tau)[kA_s - a_1] - p(\tau)a_2, \quad (11)$$

которое при квазиустановившихся параметрах p и $V_{ск}$ описывает состояние саморегулирования и стационарности процессов разрушения и образования пленок вторичных структур.

Вторая часть данной публикации будет посвящена статическому и динамическому регулированию удельных нагрузок в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза.

Выводы. Саморегулирование внутренних параметров рабочих слоев металлополимерной пары трения при контактно-импульсном взаимодействии произведено на основе оценки работы выхода электронов и ионов, при равенстве их потенциальных барьеров, зависящих от генерируемых токов электрического и теплового пятен контактов микровыступов. При этом рабочая поверхность фрикционной накладки, являющаяся электротом, находилась в метастабильном состоянии при температурах ниже и выше допустимой для ее материалов.

Разработаны физические модели регулирования внешних параметров на основе квазипостоянных удельных нагрузок при взаимодействии площадей пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения при переменных скоростях скольжения и выведена аналитическая зависимость для установления закономерностей изменения нормального износа в зависимости от физико-химических свойств фрикционных материалов полимерных накладок, полей токов нагружения и скоростных токов компонентов омывающих сред.

Список литературы

1. Джанахмедов А.Х. Нефтяная трибология / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 2003. – 326 с.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.
3. Вольченко Н.А. Градиенты электротепловых полей металлополимерных пар трения тормозных устройств / Н.А. Вольченко, С.И. Криштопа, А.В. Возный // Вестник СевНТУ: Сб. научн. тр. – Севастополь, 2013. – Вып. 142. – С. 138–142.
4. Мусалимов В.М. Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.
5. Мамедов Р.К. Контакты металл-полупроводник с электрическим полем пятен / Р.К. Мамедов. – Баку: Госуниверситет, 2013. – 231 с.
6. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. Ред. Б.И. Костецкого. – Киев: Техника, 1976. – 296 с.

References

1. Džhanahmedov A.H. Neftjanaja tribologija / A.H. Džhanahmedov. – Baku: Jelm, 2003. – 326 s.
2. Gorjacheva I.G. Mehanika frikcionnogo vzaimodejstvija / I.G. Gorjacheva. – M.: Nauka, 2001. – 475 s.
3. Vol'chenko N.A. Gradienty jelektroteplovyh polej metallopolimernyh par trenija tormoznyh ustrojstv / N.A. Vol'chenko, S.I. Krishtopa, A.V. Voznyj // Vestnik SevNTU: Sb. nauchn. tr. – Sevastopol', 2013. – Vyp. 142. – S. 138–142.
4. Musalimov V.M. Dinamika frikcionnogo vzaimodejstvija / V.M. Musalimov, V.A. Valetov. – SPb.: SPbGU ITMO, 2006. – 191 s.
5. Mamedov R.K. Kontakty metall-poluprovodnik s jelektricheskim polem pjaten / R.K. Mamedov. – Baku: Gosuniversitet, 2013. – 231 s.
6. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / Pod obshh. Red. B.I. Kos-teckogo. – Kiev: Tehnika, 1976. – 296 s.