

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 1**

УДК 621.891

Для моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения в стендовых условиях рассмотрено: физическое и механическое подобие фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов, а также раскрыто взаимодействие "обода тормозного барабана - накладок колодок" барабанно - колодочного тормоза автомобиля.

Ключевые слова: моделирование, физическое и динамическое подобие, барабанно - колодочный тормоз, металлополимерные пары трения, микровыступ, пятно контакта, динамическая и тепловая нагруженность, электротермомеханическое трение и изнашивание.

Введение

Металлополимерные пары и узлы трения современных машин и агрегатов работают в тяжелых нестационарных условиях, обусловленных действием больших удельных нагрузок, скоростей скольжения и, как следствие, высоких поверхностных температур. Последние вызывают резкое снижение эффективности металлополимерных пар трения барабанно-колодочных тормозов автомобилей, что способствует увеличению времени торможения, и как следствие, негативно влияет на безопасность их движения, сохранность пассажиров и грузов.

В связи с вышеизложенным особые требования предъявляются к выбору металлополимерных пар трения путем испытаний в стендовых условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Многочисленные исследования [1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 и др.], касающиеся металлополимерных пар трения, испытанных на различных типах машин трения и износа, а также на различных модификациях тормозных стенов применительно к барабанно-колодочным тормозам автомобилей позволили установить следующее:

- опытные образцы машин трения и износа не отвечают натурным элементам трения не только по геометрическим параметрам, но и по энергонагруженности [1 - 5];
- наблюдаются существенные различия в экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях по сравнению с эксплуатационными условиями;
- имеют место различные энергетические уровни поверхностных и подповерхностных слоев опытных образцов и натуральных пар трения; элементы последних являются своего рода аккумулятором энергии и электротетом (накопителем электронов и ионов) [6, 7, 9];
- отсутствует четкая методологическая база перехода от стендовых испытаний натурных металлополимерных пар трения к их исследованиям в эксплуатационных условиях [8, 9, 10].

Существенное влияние на закономерности трения и изнашивания рабочих поверхностей фрикционных узлов тормозных устройств оказывает температурное поле, в значительной степени определяющее их эксплуатационные параметры (удельные нагрузки, скорости скольжения, динамические коэффициенты трения, тормозные моменты).

Расчету температурных полей при трении посвящен ряд работ, в которых реализованы следующие методы: аналитический, численный, аналоговый, графический, экспериментальный и др. [5, 6]. Однако ни в одном из методов не учитывается, что теплообразование происходит не только на поверхности трения, но и в материале фрикционных накладок за счет термодеструкционных и термохимических процессов, наблюдающихся при температурах выше допустимой для материала.

Цель работы – предложить новую трактовку физического и динамического подобия фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов, а также пар трения при электротермомеханическом режиме нагружения.

Постановка проблемы

Процессы, происходящие в поверхностных слоях фрикционных накладок могут вызвать стабилизационное тепловое состояние металлических фрикционных элементов при условии, что выделяемые газы и образовавшийся конденсат в порах поверхностного слоя материала принудительно охлаждают его рабочую поверхность и ведут к изменению в нем направления градиента температурного поля на противоположное.

На основании вышеизложенного поверхностные температуры пар трения фрикционных узлов тормозов необходимо определять на двух уровнях: первый – до достижения материалом накладки допустимой температуры; второй – при превышении материалом накладки допустимой температуры.

При этом тепловое состояние металлического фрикционного элемента рассматривается также на двух уровнях: первый – нижний диапазон установившейся поверхностной температуры; второй – верхний диапазон установившейся поверхностной температуры связан с минимальным температурным градиентом обода металлического фрикционного элемента.

Такой нетрадиционный подход к тепловой задаче приведет к тому, что при рассмотрении модели фрикционного узла тормоза необходимо не только связывать его нагружение с параметрами полимерной накладки и металлического элемента, но и представлять модели объемов каждого из элементов пары трения. Для модели объема фрикционной накладки необходимо определять энергию активации разложения ее материала, а для металлического фрикционного элемента – его энергоемкость, являющаяся величиной устойчивой, при стабилизационном тепловом состоянии обода.

Материалы исследований

Физическое подобие фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов. При моделировании трибосистемы, которой является фрикционное взаимодействие пятен контактов микровыступов, находящихся под воздействием механических, электрических, тепловых и химических полей, имеют место электротермомеханические процессы при трении и изнашивании.

Узел трения является трибосистемой, подсистемами в которой являются тормозной барабан с его элементами и тормозные колодки с полимерными накладками (рис. 1, а), поверхностные и приповерхностные слои которых имеют различные энергетические уровни, как в процессе торможения, так и при разомкнутых парах трения. При этом обод тормозного барабана является аккумулятором тепловой энергии, а полимерная накладка со свойствами электрета – накопителем зарядов (электронов и ионов).

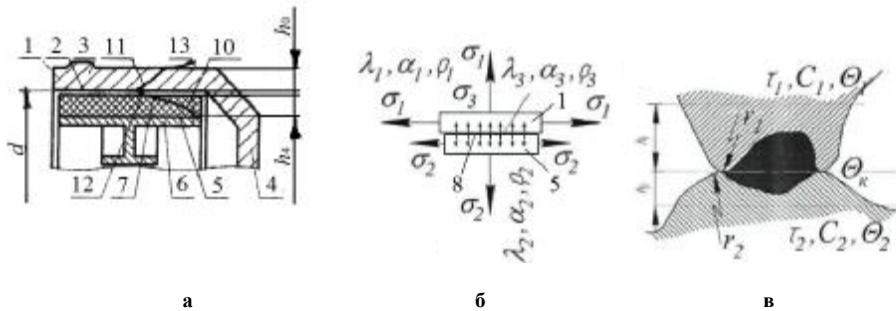


Рис. 1 – Натурное (а) и модельное (б) представление металлополимерных пар трения барабанно-колодочного тормоза автомобиля и их фрикционного взаимодействия пятен микровыступов (в):
 1, 2, 3, 4 – тормозной барабан и его конструктивные элементы: обод, подкрепляющее кольцо, боковая стенка;
 5, 8 – фрикционная накладка с поверхностным слоем; 6 – тормозная колодка; 7 – зазор между элементами трения;
 9 - 13 – закономерности изменения по толщине: накладки, обода и скоростных токов компонентов омывающей среды;
 θ_k – температура вспышки; τ – предельное напряжение сдвига

В зависимости от того, какие задачи ставятся при исследованиях узлов трения при физическом моделировании, будут реализовываться модели подсистем соответствующего уровня. Например, в подсистеме поверхности трения можно выделить подсистему 2-го порядка, компонентами которой будут структурные составляющие (кристаллиты, зерна, молекулы) элементов пятен контакта микровыступов. Использование данной подсистемы оправдано, если требуется рассмотреть процессы возникновения и развития микротрещин при оценке процесса усталостного износа и предотвратить их появление, например, с помощью изменения параметров виброакустической эмиссии при трении.

На рис. 1, а, б, в, проиллюстрированы натурное (а) и модельное (б) представление металлополимерных пар трения барабанно-колодочного тормоза автомобиля и их фрикционного взаимодействия пятен микровыступов (в). Если в подсистеме фрикционного узла тормоза (рис. 1, а) формируются эксплуатационные параметры режима (удельные нагрузки, скорость скольжения), теплопередающие поверхности и энергоемкость элементов трения, параметры формы (масса, жесткость, моменты инерции, твердость и т.д.), то в подсистеме поверхности трения (рис. 1, в) формируются параметры микрогеометрии контакта (высота и радиус активного микрообъема, площадь пятен, величина сближения контактирующих поверхностей), средняя поверхностная температура фрикционного контакта и ее градиент, объемная температура, напряженно-деформированное состояние пятен микровыступов и их механическое и тепловое искажение, а также амплитудно - частотные характеристики процессов внешнего и внутреннего (на уровне электронов и ионов) трения.

Для оценки зависимости триботехнических параметров узла трения от параметров нагружения, состояния поверхности трения, температуры, влияния скоростных токов компонентов омывающей среды достаточно ограничиться подсистемой первого порядка, оценки параметров которой представлены на рис. 2.

Динамическое подобие подсистемы фрикционного взаимодействия пятен контактов микровыступов. Суммарная энергия колебаний микровыступов распределена по спектру генерируемых ею частот и представляет собой, по отношению к микронеровностям пятен контактов, находящихся под воздействием внешнего силового поля, волны напряжений в тангенциальном и нормальном направлениях. В установившемся режиме работы параметры силового поля фрикционного взаимодействия являются постоянными.

В результате взаимного перемещения поверхностей пятен микронеровностей при фрикционном взаимодействии возникают вынужденные волны напряжений. Спектр их частот очень обширен, поэтому практически всегда он "перекрывает" спектр частот возмущающих волн, генерируемых тормозными механизмами. Нормальные и тангенциальные волны напряжений, возникающие на пятнах контактов микронеровностей, будут зависеть от координат, времени, относительной скорости скольжения и максимальной поверхностной температуры, так как, кроме данных волн колебаний, контактирующие микрообъемы материалов испытывают флуктуации вследствие электрических и тепловых токов, генерируемых при фрикционных взаимодействиях.

При этом микронеровности контактирующих поверхностей будут формироваться и стремиться занять относительно друг друга такое положение, чтобы потери энергии при их взаимном передеформировании были минимально возможны. Поверхности трения микровыступов приобретают характер равновесной шероховатости и характеризуются относительно стабильными их геометрическими очертаниями. Изменение приведенной жесткости трибосистемы (или приведенного момента инерции) однозначно приводит к реализации переходных и вторичных процессов трения, по завершении которых на контакте устанавливается новая равновесная шероховатость за счет формирования восстановленных вторичных структур I и II типа (по данным Б.И. Костецкого) [10].

Процесс формирования равновесной шероховатости на поверхностях пятен контактов происходит при резонансе, возникающем между собственной несущей частотой волн напряжений на поверхностях контактов и частотой колебаний напряжений, соответствующих одной из собственных частот колебаний трибосистемы. Данное устойчивое состояние заключается в формировании одной несущей частоты трибоспектра и совпадением ее с n -ой собственной частотой трибосистемы.

Основным критерием достоверности модельного эксперимента следует считать реализацию в условиях модели одинакового с натурным образом вида изнашивания контактирующих поверхностных слоев микровыступов и интенсивности их износа. Для реализации условий динамического подобия при моделировании электротермомеханического трения и его процессов, явлений и эффектов требуется выполнения следующих условий:

- процесс фрикционного взаимодействия должен реализовываться в реальном масштабе времени, то есть $C_t = 1$;
- собственные с одной стороны и характерные собственные частоты колебаний с другой стороны следует рассматривать как физико - механическую природу пятен микровыступов при электротермомеханическом установившемся режиме трения, то есть при реализации идентичных равновесных шероховатостей натурального образца и его модели;
- для реализации равновесной шероховатости при модельных и натуральных испытаниях ее геометрические характеристики, например, высота и радиус закругления микронеровностей, должны быть одинаковы, то есть константа подобия высоты микронеровностей $C_h = 1$, радиуса закругления микронеровностей $C_r = 1$;
- величины амплитуд деформаций контактирующих микро- и макронеровностей фрикционного контакта и связей трибосистемы при модельных и натуральных испытаниях равны единице: $C_A = 1$, где A – амплитуды колебаний связей трибосистемы и деформаций пятен контактов на микро- и макроуровнях;
- равенство скоростей скольжения для натурального образца и его модели, т.е. $C_{V_{ск}} = 1$;
- процесс изменения геометрии пятен контактов микровыступов идет до тех пор, пока на их поверхностях не произойдет выравнивание удельных нагрузок q . Это позволяет охарактеризовать последние на поверхности трения как критерий, равенство которого для реальной поверхности трения и модели является определяющим, то есть $C_q = q_n/q_m = 1$.

С учетом полученного из условий динамического подобия:

- условия равенства скоростей скольжения и параметров шероховатости для модели и натурной, равенство удельных нагрузок обеспечивает реализацию на поверхности трения пятен контактов процессы восстановления и разрушения вторичных структур I и II типа;
- для достижения равенства удельных нагрузок импульсные нормальные силы на площадках контакта должны иметь масштабный коэффициент перехода от натурной к модели, равный масштабному коэффициенту площади контакта, то есть $C_N = C_S = C_l^2$;
- равенство контактных давлений для объекта и модели, т.е. $C_q = 1$, определяет равенство масштабного коэффициента массы $C_m = C_l^2$, так как, во-первых, удельная нагрузка прямо пропорционально

силе и обратно пропорционально площади контакта $q = N/S$ (или в константах подобия $C_q = C_l^2 / C_l^2 = 1$), во-вторых, масса прямо пропорциональна силе $m = N/g$, где g – ускорение свободного падения ($C_g = 1$), т.е. масштабный фактор массы имеет единицу измерения $C_m = C_N = C_l^2$;

- при одинаковых условиях на пятнах контактов для модели и реальной поверхности, равным сближениям соответствуют равные динамические коэффициенты трения f и равные удельные линейные износы \dot{i}_h ;

- исследователь вправе выбирать геометрический масштаб модели C_l и пропорционально изменять, например, номинальную площадь контакта S , т.е. $C_S = C_l^2$.

Непосредственно фрикционный контакт на уровне взаимодействия пятен микровыступов моделирования не требует, поскольку отвечает условиям самоорганизующихся процессов. Необходимые условия для его реализации определены тем, что материалы поверхностей трения, параметры шероховатости, скорость скольжения, путь трения, удельные нагрузки, условия циркуляции скоростных токов компонентов среды и их моделей равны. Узел электротермомеханического трения "обод тормозного барабана – накладки колодки" автомобиля является составной частью фрикционно - механической системы тормозного механизма. Массы тормозного барабана m_1 и тормозной колодки с накладками m_2 и их микровыступы совершают взаимные перемещения (рис. 1, а) и являются неотъемлемой составляющей трибосистемы.

Физическое подобие фрикционного взаимодействия "обод тормозного барабана - накладки колодок" барабанно - колодочного тормоза автомобиля. В соответствии с данными структурной модели (рис. 2) процессов трения и изнашивания узла трения, функциональная зависимость процесса представляется в общем виде:

$$f = \Phi[\sigma; N; V; C; k; q; \Delta\theta; J; \beta; HB; E; \tau; L; S; F; U; c; A; S_{xx}; W_{xy}; V_N; \Theta],$$

где σ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°К);

N – импульсная нормальная сила прижатия микровыступов обода барабана к микровыступу накладки, Н;

V – скорость скольжения, м/с;

C – линейная жесткость связей, Н/м;

k – частота собственных колебаний, с⁻¹;

q – удельные нагрузки в контакте, Па;

$\Delta\theta$ – поверхностный температурный градиент, °К/м;

J – момент инерции, кг·м²;

β – вязкое демпфирование, (Н·с)/м;

HB – твердость материалов;

E – модуль упругости, Па;

τ – время трения, с;

L – путь трения, м;

S – площадь контакта, м²;

F – сила трения, Н;

U – весовой износ, кг/м³;

c – коэффициент удельной теплоемкости, Дж/(кг·°К);

A – амплитуда деформации связей, м;

S_{xx} – спектральная плотность мощности амплитудного импульса силы трения, приходящаяся на единицу площади касания, Н²/(Гц·м²);

W_{xy} – комплексный коэффициент передачи двух сигналов;

V_N – скорость нарастания импульсной нормальной силы, Н/с;

θ – поверхностная температура, °К.

На этапе моделирования полей механического, электрического и теплового подобия всей трибосистемы необходимо учесть ограничения, определяющие ее динамику и условия без трения, и тождественность протекания идентичных физических процессов на фрикционном контакте модели и объекта. Для этого при использовании метода анализа размерностей с ограничениями [6, 8] частота колебаний ω , удельные нагрузки q и поверхностный градиент температуры $\Delta\theta$ вводятся в краевые условия.

В системе основных единиц $MLT\theta$ (масса, длина, время и температура) выбираем четыре базисных параметра, оказывающих наиболее существенное влияние на процессы электротермомеханического трения и изнашивания трибосистемы и поддающиеся измерению при испытаниях в лабораторных условиях:

1. Коэффициент теплоотдачи, $\sigma - |\sigma| = |M^1 L^0 T^{-3} \Theta^{-1}|$.
2. Импульсную нормальную силу, $N - |N| = |M^1 L^1 T^{-2} \Theta^0|$.
3. Скорость скольжения $V - |V| = |M^0 L^1 T^{-1} \Theta^0|$.
4. Геометрический масштаб $l - |l| = |M^0 L^1 T^0 \Theta^0|$.

Система уравнений, образованная четырьмя базисными параметрами, имеет вид:

$$\begin{aligned} \ln \sigma &= \ln M + 0 \cdot \ln L - 3 \cdot \ln T - \ln \Theta; \\ \ln N &= \ln M + \ln L - 2 \cdot \ln T + 0 \cdot \ln \Theta; \\ \ln V &= 0 \cdot \ln M + \ln L - \ln T + 0 \cdot \ln \Theta; \\ \ln l &= 0 \cdot \ln M + \ln L + 0 \cdot \ln T + 0 \cdot \ln \Theta. \end{aligned}$$

Главный определитель D_0 системы уравнений в числовой форме, образованный параметрами $MLT\Theta$, представляется в виде:

$$D_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -3 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1.$$

Определитель $D_0 \neq 0$, что подтверждает независимость выбранных в качестве базисных единиц измерений параметров σ , N , V , l . В качестве крайних условий выбираем частоту колебаний, удельные нагрузки и поверхностный градиент температуры, то есть $C_k = 1$, $C_q = 1$, $C_{\Delta\Theta} = 1$, чем достигается приращение одинаковых параметров природы и модели.

Расчет масштабных коэффициентов перехода для принятой модели и натурального образца относительно заданного масштабного коэффициента линейных размеров C_l проводится по программе, реализующей алгоритм решения линейных уравнений с n неизвестными. Результаты произведенного расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета основных параметров модели узла трения

| Параметр | Размерность в системе СИ | Критерий подобия, = idem | Масштабный коэффициент перехода | Формула пересчета с оригинала на модель |
|----------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Коэффициент теплопередачи, σ | Вт/(м ² ·°К) | Базисный параметр | $C_\sigma = C_l^0 = 1$ | $(\sigma)_M = (\sigma)_H$ |
| Импульсная нормальная сила, N | Н | Базисный параметр | $C_N = C_l^2$ | $(N)_M = \frac{(N)_H}{C_l^2}$ |
| Скорость скольжения, V | м/с | Базисный параметр | $C_V = C_l$ | $(V)_M = \frac{(V)_H}{C_l}$ |
| Геометрические размеры, l | м | Базисный параметр | $C_l = 5$ – задается | |
| Частота колебаний, k | Гц | $\pi_k = \frac{kl}{V}$ | $C_k = 1$ | $(k)_M = (k)_H$ |
| Удельная нагрузка, q | Па | $\pi_q = \frac{ql^2}{N}$ | $C_q = 1$ | $(q)_M = (q)_H$ |
| Поверхностный градиент температуры, $\Delta\Theta$ | °К/м | $\pi_{\Delta\Theta} = \frac{\Delta\Theta\sigma l^3}{NV}$ | $C_{\Delta\Theta} = 1$ | $(\Delta\Theta)_M = (\Delta\Theta)_H$ |
| Момент инерции, J | кг·м ² | $\pi_J = \frac{JV^2}{Nl^3}$ | $C_J = C_l^3$ | $(J)_M = \frac{(J)_H}{C_l^3}$ |

Продолжение таблицы 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Жесткость стыка, C | Н/м | $\pi_C = \frac{C}{Nl}$ | $C_C = C_l^3$ | $(C)_M = \frac{(C)_H}{C_l^3}$ |
| Демпфирование, β | (Н·с)/м | $\pi_\beta = \frac{\beta V}{N}$ | $C_\beta = C_l$ | $(\beta)_M = \frac{(\beta)_H}{C_l}$ |
| Твердость, HB | Па | $\pi_{HB} = \frac{HBl^2}{N}$ | $C_{HB} = 1$ | $(HB)_M = (HB)_H$ |
| Модуль упругости, E | Па | $\pi_E = \frac{El^2}{N}$ | $C_E = 1$ | $(E)_M = (E)_H$ |
| Время трения, t | с | $\pi_t = \frac{tV}{l}$ | $C_t = 1$ | $(t)_M = (t)_H$ |
| Путь трения, L | м | $\pi_L = \frac{L}{l}$ | $C_L = C_l$ | $(L)_M = \frac{(L)_H}{C_l}$ |
| Площадь трения пятен контактов, S | м ² | $\pi_S = \frac{S}{l^2}$ | $C_S = C_l^2$ | $(S)_M = \frac{(S)_H}{C_l^2}$ |
| Сила трения, F | Н | $\pi_F = \frac{F}{N}$ | $C_F = C_l^2$ | $(F)_M = \frac{(F)_H}{C_l^2}$ |
| Весовой износ, I | кг/м ³ | $\pi_{Im} = \frac{I_m V^2 l^2}{N}$ | $C_{Im} = C_l^{-2}$ | $(I_m)_M = \frac{(I_m)_H}{C_l^{-2}}$ |
| Теплоемкость, C | Дж/°К | $\pi_C = \frac{CV}{\sigma l^3}$ | $C_C = C_l^2$ | $(C)_M = \frac{(C)_H}{C_l^2}$ |
| Масса, m | кг | $\pi_m = \frac{mV^2}{Nl}$ | $C_m = C_l^2$ | $(m)_M = \frac{(m)_H}{C_l^2}$ |
| Амплитуда деформации связей, A | м | $\pi_A = \frac{A}{l}$ | $C_A = 1$ | $(A)_M = (A)_H$ |
| Спектральная плотность мощности импульсов на единицу площади касания S_{xx} | Н ² /(Гц·м ²) | $\pi_{S_{xx}} = \frac{S_{xx} l^3}{N^2 V}$ | $C_{S_{xx}} = C_l^2$ | $(S_{xx})_M = \frac{(S_{xx})_H}{C_l^2}$ |
| Комплексный коэффициент фрикционного взаимодействия, W_{xy} | $\frac{H^2 / (M^2 \cdot \text{Гц})}{H^2 / (M^2 \cdot \text{Гц})}$ | $\pi_{W_{xy}} = W_{xy}$ | $C_{W_{xy}} = \frac{C_{S_{xy}}}{C_{S_{yy}}} = 1$ | $(W_{xy})_M = (W_{xy})_H$ |
| Скорость нарастания импульсной нормальной силы, V_N | Н/с | $\pi_{V_N} = \frac{lV_N}{NV}$ | $C_{V_N} = C_l^2$ | $(V_N)_M = \frac{(V_N)_H}{C_l^2}$ |
| Температура обода тормозного барабана, Θ | °К | $\pi_\Theta = \frac{\Theta \sigma l^2}{NV}$ | $C_\Theta = C_l$ | $(\Theta)_M = \frac{(\Theta)_H}{C_l}$ |
| Коэффициент взаимного перекрытия, K_{B3} | - | $\pi_{K_{B3}} = \frac{S_1 l_2^2}{l_1^2 S_2}$ | $C_{K_{B3}} = 1$ | $(k_{B3})_M = (k_{B3})_H$ |
| Сопrotивление пленке срезу (вторичных структур I и II типа), δ | Па | $\pi_\delta = \frac{\delta l^2}{N}$ | $C_\delta = 1$ | $(\delta)_M = (\delta)_H$ |

Уравнение подобия, объединившее полученные критерии, состоит из 22 критериев, так как, согласно теореме Бэкинга, должно быть равно числу параметров за вычетом четырех базисных:

$$f = f \left(\frac{kl}{V}, \frac{ql^2}{N}, \frac{\Delta \Theta}{NV}, \frac{l^3 \sigma}{l^3 N}, \frac{JV^2}{lN}, \frac{C}{N}, \frac{\beta V}{N}, \frac{H l^2 B}{N}, \frac{l^2 E}{N}, \frac{tV}{l}, \frac{L}{l}, \frac{S}{l^2}, \frac{F}{N}, \frac{l_m V^2 l^2}{N}, \frac{cV}{l^3 \sigma}, \frac{V^2 m}{Nl}, \frac{A}{l}, \frac{S_{xx} l^3}{N^2 V}, W_{xy}, \frac{V_N l}{NV}, \frac{\Theta \sigma l^2}{NV}, \frac{S_1 l^2}{S_2 l^2}, \frac{l^2 \delta}{N} \right)$$

Рассмотрим несколько разнородных "стандартных" критериев, характеризующих соотношения силовых, теплофизических процессов и процессов омывающих скоростных токов компонентов среды.



Рис. 2 – Структурная схема электротермомеханического трения и изнашивания фрикционного узла "обод тормозного барабана - накладки колодки"

1. *Критерий гомохронности*, характеризующий однородность процессов во времени:

$$V \cdot t/L = \text{idem},$$

где V – скорость;

t – время;

L – путь, в реализованном моделировании получается, если критерий времени π_t разделить на критерий пути трения π_L , то есть:

$$\frac{tV}{l} / \frac{L}{l} = \frac{tV}{L} = \text{idem}.$$

Так как в выражение критерия гомохронности входят параметры V , t , L , то даже если ни один из этих параметров не входит в число базисных, перемножение критериев скорости и времени и деление на критерий пути в результате обеспечивает получение критерия гомохронности.

2. *Критерий Ньютона*, характеризующий отношение удельной нагрузки к удвоенной плотности энергии получим, если критерий силы трения π_F умножим на критерий времени π_t , разделим на критерий массы π_m и подставим значение $V = L/t$, то есть:

$$\left(\frac{tV}{l} / \frac{mV^2}{Nl} \right) \cdot \left(\frac{F}{N} \right) = \frac{tF}{mV} = \frac{t^2 F}{mL} = \text{idem}.$$

3. *Критерий Фруда*, характеризующий относительную величину силы тяжести получим, если критерий массы π_m разделим на критерий времени π_t с последующей подстановкой $N = mg$ и $V = L/t$:

$$\left(\frac{mV^2}{Nl} \right) / \left(\frac{tV}{l} \right) = \frac{mV}{Nt} = \frac{L}{gt^2} = \text{idem},$$

умножив на квадрат критерия гомохронности получаем:

$$\left(\frac{L}{t^2 g} \right) \cdot \left(\frac{tV}{L} \right)^2 = \frac{V^2}{Lg} = \pi_{Fr}.$$

4. *Критерий Био*, характеризующий отношение перепада температуры по толщине обода к разности его температур и компонентов среды, можно получить, если критерий градиента поверхностного градиента температуры $\pi_{\Delta\theta}$ разделить на критерии разности температур π_θ и линейных размеров π_l :

$$\left(\frac{\Delta\theta\sigma l^3}{NV} \right) / \left(\frac{\Delta\theta\sigma l^3}{NV} \right) = \pi_{Bio}.$$

5. *Критерий Нуссельта*, характеризующий коэффициент теплоотдачи для компонентов омывающей среды можно получить, если критерий пути π_L разделить на критерии теплопроводности π_λ :

$$\left(\frac{L}{l} \right) / \left(\frac{\lambda}{\sigma l} \right) = \frac{L\sigma}{\lambda} = \pi_{Nu}.$$

6. *Критерий Фурье*, характеризующий для нестационарных процессов соответствие между средней скоростью изменения условий в компонентах омывающей среды и средней скоростью перестройки температурного поля внутри тела получим, если критерий температуропроводности $\pi_{\theta l}$ разделим на критерии пути трения π_L с последующей подстановкой $V=L/t$:

$$\left(\frac{\Theta_l}{Vl} \right) / \left(\frac{L}{l} \right) = \frac{\Theta_l}{VL} = \frac{\Theta_l t}{L^2} = \pi_F.$$

Для учета взаимного влияния фрикционных подсистем рассматриваемой трибосистемы необходимо выполнение дополнительно выведенных критериев, однозначно характеризующих исследуемые триботехнические процессы.

1. *Критерий идентичности реализации тормозного усилия*, характеризующий постоянную величину тормозного усилия получим, если критерий номинальной площади фрикционного контакта π_S умножить на критерий сопротивления пленок загрязнений срезу π_δ и разделить на критерии скорости нарастания нагрузки π_{v_n} и коэффициента взаимного перекрытия $\pi_{K_{\delta 3}}$ с последующей подстановкой $V=L/t$:

$$\left(\frac{S}{l^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma l^2}{N} \right) / \left(\frac{V_N l}{NV} \right) \cdot \left(\frac{S_1 l_2^2}{l_1^2 S_2} \right) = \frac{SV\delta}{V_N k_{B3} L} = \frac{S\delta}{V_N k_{B3} t} = \pi_I = \text{idem},$$

где V – линейная скорость вращения тормозного диска;

L – путь трения;

t – время торможения.

2. Критерий идентичности вынужденного охлаждения обода тормозного барабана получим, если критерий поверхностной температуры обода π_θ умножить на критерий его площади π_S обдуваемого скоростными токами компонентов среды:

$$\left(\frac{\Theta\sigma l^2}{NV}\right) \cdot \left(\frac{S}{l^2}\right) = \frac{\Theta\sigma S}{NV} = \pi_\theta = \text{idem},$$

где σ – коэффициент теплопередачи через элементы трения;

N – импульсное нормальное усилие, действующие на микровыступы обода;

V – скорость скольжения.

3. Критерий идентичности тормозного пути получим, если критерий тормозного пути трения π_L разделить на произведение критериев площади пятна контакта шины $\pi_{S_{ш}}$, давления воздуха в шине π_P и времени торможения π_t (с) последующей подстановкой $V = L/t$:

$$\left(\frac{L}{l}\right) / \left[\left(\frac{Pl^2}{N}\right) \cdot \left(\frac{S_{ш}}{l^2}\right) \cdot \left(\frac{tV}{l}\right)\right] = \frac{NL}{S_{ш}PVt} = \frac{N}{S_{ш}P} = \pi_L = \text{idem}$$

где N – нормальная нагрузка на колесо;

V – линейная скорость автомобиля.

Таким образом, выполненные расчеты позволяют определить масштабные коэффициенты перехода от объекта исследования к модельному эксперименту, выполнить стендовые испытания и перенести результаты испытаний на объект исследования. На базе физико - математического моделирования изготовлено три экспериментальных стенда для исследования электротермомеханического трения в металлополимерных парах трения барабанно - колодочного тормоза автомобиля.

Выводы

Таким образом, на основании теории подобия и размерностей произведен первый этап моделирования фрикционного взаимодействия «обод тормозного барабана - накладки колодок» барабанно-колодочного тормоза.

Литература

1. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1980. – 394 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Берлиндер, Э.Д. Браун и др. Под. общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
6. Харламов П.В. Трибоспектральная идентификация и прогнозирование критического состояния подсистемы «тормозной диск – колодка» автомобиля: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Харламов Павел Викторович. – Ростов на Дону, 2009. – 172с.
7. Ленточно-колодочные тормозные устройства. [Монография] / Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, Д.Ю. Журавлев, А.В. Возный. – Кубанск. государств. технолог. ун-т. и Прикарпатск. национальн. ун-т им. В. Стефаника, 2013. – 441 с.
8. Шаповалов В.В. Комплексное моделирование динамически нагруженных узлов трения машин / В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 1985. – №3. – С. 451-457.
9. Шаповалов В.В. Взаимосвязь процессов трения и динамических характеристик механических систем: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / В.В. Шаповалов. – М.: ВНИИЖТ, 1988. – 36с.
10. Заковоротный В.Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция / В.Л. Заковоротный. – Ростов на Дону: ДГТУ, 2003. – 501 с.

Поступила в редакцию 13.01.2014

Kryshchtopa S.I. Design of the power loading of metallic polymer friction pairs at stand conditions. Part 1.

On the basis of theory of similarity and sizes the first stage of design of cooperation of friction is made "rim of brake drum - protective straps" of drum - block brake. A new interpretation of physical and dynamic similarity of cooperation of friction of spots of contacts of microscopic ledges and also of friction pairs is offered at electro - thermo mechanical mode of loading.

For the design of the power loading of metallic polymer friction pairs it is considered at stand conditions: physical and mechanical similarity of cooperation of friction of spots of contacts of microscopic ledges and also cooperation of "rim of brake drum - protective straps" of drum - block brake of a car is exposed. The executed calculations allow define the scale factors of transition from the object of research to the model experiment, to execute the stand tests and carry the results of tests on the object of research.

On the base of physical and mathematical design three experimental stands are made for research electro - thermo mechanical friction in the metallic polymer friction pairs of drum-block brake of the car.

Key words: design, physical and dynamic similarity, drum -block brake, metallic polymer friction pairs, microscopic, contact patch, dynamic and thermal loading, electro – thermal - mechanical friction and wear.

References

1. Kosteckij B.I. *Trenie, smazka i iznos v mashinah.* – Kiev Tehnika, 1980. 394 s.
2. *Trenie, iznos i smazka (tribologija i tribotehnika).* A.V. Chichinadze, Je.D. Berlinder, Je.D. Braun i dr. Pod. obshh. red. A.V. Chichinadze. M. Mashinostroenie, 2003. 576s.
3. Kragel'skij I.V. *Trenie i iznos.* M.: Mashinostroenie, 1986. 480 s.
4. Gorjacheva I.G. *Mehanika frikcionnogo vzaimodejstvija.* M.: Nauka, 2001. 475 s.
5. Garkunov D.N. *Tribotehnika.* M.: Mashinostroenie, 1989. 328 s.
6. Harlamov P.V. *Tribospektral'naja identifikacija i prognozirovanie kriticheskogo sostojanija podsistemy «tormoznoj disk – kolodka» avtomobilja:* diss. ... kand. tehn. nauk: 05.02.04. Rostov na Donu, 2009. 172s.
7. *Lentochno-kolodochnye tormoznye ustrojstva.* [Monografija]. N.A. Vol'chenko, D.A. Vol'chenko, S.I. Krishtopa, D.Ju. Zhuravlev, A.V. Voznyj. Kubansk. gosudarstv. tehnolog. un-t. i Prikarpat'sk. nacional'n. un-t im. V. Stefanika, 2013. 441 s.
8. Shapovalov V.V. *Kompleksnoe modelirovanie dinamicheski nagruzhennyh uzlov trenija mashin.* *Trenie i iznos.* 1985. №3. S. 451-457.
9. Shapovalov V.V. *Vzaimosvjaz' processov trenija i dinamicheskikh harakteristik mehanicheskikh mehanicheskikh sistem:* avtoref. diss. ... dokt. tehn. nauk. M.: VNIIZhT, 1988. 36s.
10. Zakovorotnyj V.L. *Dinamika tribosistem. Samoorganizacija, jevoljucija.* Rostov na Donu: DGTU, 2003. 501 s.