

- 3 Understanding smart cities: An integrative framework / H. Chourabi [et al.] // 45th Hawaii international conference on system sciences. – IEEE, 2012. – P. 2289–2297.
- 4 Towards the development of intelligent transportation systems / L. Figueiredo [et al.] // ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings. – IEEE, 2001. – P. 1206–1211.
- 5 **Harrison, C.** A Theory of Smart Cities / C. Harrison, I. A. Donnelly // In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences (ISSS 2011). – Hull, UK. – P. 1–15.
- 6 **Klein, L. A.** Sensor Technologies and Data Requirements for ITS / L. A. Klein. – Artech House Publishers Norwood, MA, USA. – 2001. – 549 p.
- 7 Object Management Group. Object Constraint Language, Object Management Group [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://www.omg.org/>. – Date of access : 28.08.2020.
- 8 Tokyo virtual living lab: Designing smart cities based on the 3D-internet / H. Prendinger [et al.] // IEEE Internet Computing. – 2013. – Vol. 17. – No. 6. – P. 30–38.
- 9 **Pursula, M.** Simulation of traffic systems-an overview / M. Pursula // Journal of geographic information and decision analysis. – 1999. – Vol. 3. – No. 1. – P. 1–8.
- 10 **Tewolde, G. S.** Sensor and network technology for intelligent transportation systems / G. S. Tewolde // 2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. – IEEE, 2012. – P. 1–7.
- 11 **Сундукова, Т. О.** Эмерджентное моделирование и математическое образование XXI века / Т. О. Сундукова, Г. В. Ванькина, Г. Н. Колесников // Вопросы теории и практики инновационного развития науки и образования. – 2018. – С. 44–51.

УДК 621.891

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

Э. С. ВЕЛИЗАДЕ

Азербайджанский технический университет, г. Баку

Одним из важнейших узлов, определяющих безопасность, надежность и долговечность колесных машин является фрикционная пара «барабан-накладка» тормозного механизма. Эффективность работы многих типов фрикционных пар тормозного механизма в значительной степени зависит от температуры трущихся элементов. Трущаяся пара «барабан-накладка» грузового автомобиля работает в условиях сложного напряженного состояния. Для управления процессами трения и изнашивания в паре трения «барабан-накладка» тормозного механизма необходимо исследование разрушения материала при трении, вызванного контактным действием температуры и температурного градиента. Тепловым разрушением при разработке пары трения тормозного механизма автомобиля на стадии проектирования можно управлять [1–3] конструкторско-технологическими методами, в частности геометрией поверхности трения. Решение таких задач механики по построению микрогеометрии трибосопряжения будет способствовать уменьшению теплонапряженности и износа.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние фрикционной накладке при торможении. При многократном повторно-кратковременном режиме торможения происходит взаимодействие между контактирующими поверхностями, возникают силы трения, приводящие к изнашиванию материалов сопряжения. Для определения контактного давления необходимо рассмотреть износоконтактную задачу о вдавлении накладки в поверхность тормозного барабана [4].

Проведем теоретический анализ по определению микрогеометрии поверхности трения, которая обеспечивала бы распределение температуры трущейся поверхности близкое к равномерному. Таким образом, выбором микрогеометрии поверхности трения добьемся снижения температуры.

В качестве управляющих переменных используем параметры микрогеометрии поверхности трения. В качестве математической модели принимаем дифференциальные уравнения термоупругости с соответствующими граничными условиями, которым должны удовлетворять компоненты тензора напряжений и вектора перемещений в накладке и тормозном барабане, а также кинетическое уравнение абразивного износа материалов накладки и барабана.

Считается, что к внутренней поверхности барабана прижимается накладка с другими механическими характеристиками. Область контакта занимает всю ширину накладки и не меняется в процессе торможения. Предполагаем, что выполняются условия плоской деформации. Отнесем накладку к полярной системе координат $r\theta$ и представим неизвестную границу наружного контура накладки в виде

$$r = \rho(\theta), \quad \rho(\theta) = R + \varepsilon H(\theta). \quad (1)$$

Здесь функция $H(\theta)$ подлежит определению, ε – малый параметр.

Неизвестный внутренний контур барабана ищется в аналогичном виде, в котором подлежит определению функция $H_1(\theta)$. Функции $H(\theta)$ и $H_1(\theta)$ ищутся в виде рядов Фурье.

Требуется определить микрогеометрию поверхности трения, т. е. функции $H(\theta)$ и $H_1(\theta)$, при которых обеспечивалось бы равномерное распределение температуры на контактной поверхности трущейся пары.

Условие, связывающее перемещения накладки и барабана, имеет вид

$$v_1 + v_2 = \delta(\theta) \quad (|\theta| \leq \theta_0). \quad (2)$$

Здесь $\delta(\theta)$ – осадка точек поверхности накладки и барабана, определяемая формой поверхности накладки и барабана, а также величиной прижимающей силы P ; $2\theta_0$ – угол обхвата фрикционных накладок.

В зоне контакта действуют нормальное давление $p(\theta, t)$ и касательное усилие, связанное с контактным давлением по закону Амонтона – Кулона. Усилия трения $\tau_{r\theta}(\theta, t)$ способствуют тепловыделению в области контакта. Общее количество тепла в единицу времени пропорционально мощности сил трения. Количество тепла, выделяемое в единицу времени на единичной площади контакта с координатой θ , будет $Q(\theta, t) = vfp(\theta, t)$, где v – скорость движения автомобиля в момент торможения; f – коэффициент трения пары. Общее количество тепла $Q(\theta, t)$ будет расходоваться следующим образом: поток тепла в накладку $Q_n(\theta, t)$ и поток тепла на повышение температуры барабана $Q_b(\theta, t)$.

Для перемещений накладки и барабана имеем

$$v_1 = v_{1e} + v_{1r} + v_{1w}; \quad v_2 = v_{2e} + v_{2r} + v_{2w}, \quad (3)$$

где v_{1e} – термоупругие перемещения точек контактной поверхности накладки; v_{1r} – перемещения, вызванные смятием микровыступов поверхности накладки, v_{1w} – перемещения, вызванные изнашиванием поверхности накладки; v_{2e}, v_{2r}, v_{2w} – то же для барабана.

Для определения v_{1e}, v_{1r} и v_{2e}, v_{2r} решаются задачи термоупругости для накладки и барабана соответственно. Коэффициенты теплопроводности материала в осевом, окружном и радиальном направлении приняты одинаковыми и независимыми от координат и температуры. Накладка моделируется круговым (кривым) брусом с сечением, близким к узкому прямоугольнику.

Для определения v_{1w} и v_{2w} используется кинетическое уравнение изнашивания материала для накладки и барабана [5].

Температурные функции, напряжения и перемещения в накладке и барабане, а также контактное давление ищем в виде разложений по малому параметру. С помощью метода возмущений для граничной задачи термоупругости, получаем последовательность краевых задач для накладки с круговыми границами для внутренней и внешней поверхности. Каждое из приближений удовлетворяет системе дифференциальных уравнений плоской термоупругости. Решение краевой задачи теории теплопроводности в каждом приближении ищется методом разделения переменных. При решении задачи термоупругости в каждом приближении используется термоупругий потенциал перемещений и метод степенных рядов.

На основе полученного решения задачи термоупругости и интегрирования кинетического уравнения изнашивания материала накладки в нулевом приближении находим перемещения ее контактной поверхности. Аналогично решается задача термоупругости для тормозного барабана и находится перемещение контактной поверхности. Найденные величины подставляются в основное контактное условие (2) в нулевом приближении. Алгебраизацию основного контактного уравнения проводим аналогично [1]. В результате получаем бесконечную алгебраическую систему. Полученные системы позволяют численными методами найти температуру, контактное давление в нулевом приближении. Аналогично строится решение износоконтактной задачи в первом приближении.

При известных функциях $H(\theta)$ и $H_1(\theta)$ полученные системы дают возможность найти температуру, контактное давление, напряжения и износ фрикционной пары. Полученная алгебраическая система уравнений пока не является замкнутой. Для построения недостающих уравнений требуем равномерного распределения температуры на контактной поверхности. Формула для температуры поверхности трения показывает, что температура линейно зависит от искомых коэффициентов ря-

дов Фурье функций $H(\theta)$ и $H_1(\theta)$. Для нахождения коэффициентов функций $H(\theta)$, $H_1(\theta)$ используем принцип наименьших квадратов.

Найденное решение поставленной задачи позволяет на стадиях проектирования и изготовления выбирать микрогеометрию поверхности трения фрикционной пары «барабан-накладка», обеспечивающую равномерное распределение температуры на поверхности контакта. Это дает возможность повысить надежность и долговечность тормозного механизма автомобиля.

Список литературы

1 **Mirsalimov, V. M.** Minimization of the thermal state of the hub of a friction pair / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // *Engineering Optimization*. – 2018. – Vol. 50, is. 4. – P. 651–670.

2 **Mirsalimov, V. M.** Inverse problem of contact fracture mechanics for a hub of friction pair taking into account thermal stresses / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // *Mathematics and Mechanics of Solids*. – 2019. – Vol. 24, is. 6. – P. 1763–1781.

3 **Mirsalimov, V. M.** Optimum problem on wear decrease for a hub of friction pair / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2020. – Vol. 27, is. 5. – P. 353–363.

4 **Мирсалимов, В. М.** Износоконтактная задача о вдавлении колодки с фрикционной накладкой в поверхность барабана / В. М. Мирсалимов, Ш. Г. Гасанов, Ш. Г. Гейдаров // *Труды XII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию ИМАШ РАН «Трибология – машиностроению»*. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. – С. 341–344.

5 **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

УДК 539.3

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОЛИЭФИРНОЙ И ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

А. Г. ГЕТМАНОВ, М. И. МАРТИРОСОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Наноиндентирование – метод, позволяющий определять механические и усталостные свойства различных пленок, покрытий и материалов на наноуровне. Исследования проводились на стальных образцах прямоугольной формы 5×10 мм, на которые наносилась порошковая полимерная краска на полиэфирной и эпоксидно-полиэфирной основе от фирм-производителей Akzo Nobel (Голландия) и Teknos (Финляндия) электростатическим распылением в покрасочной камере Gema (Швейцария). Изучались образцы различных цветов по международному каталогу RAL (анализировалась цветовая гамма из 26 покрытий). Перед нанесением покрытий на исследуемые образцы проводилась предварительная подготовка поверхностей: обезжиривание и фосфатирование. Для повышения механических свойств и придания поверхности дополнительной износостойкости и ударопрочности на окрашенную поверхность наносился прозрачный керамический нанолак CeramiClear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США). Этот лак содержит микроскопические керамические частицы, которые беспорядочно плавают в жидком лаке, а затем, затвердевая в печи полимеризации, образуют густую сетчатую структуру, которая выступает в качестве защитного слоя окрашенной поверхности и существенно улучшает её эксплуатационные свойства.

Толщина покрытия (краска + лак) исследуемых образцов составляла ~ 60 – 80 мкм и контролировалась электронным толщиномером QuaNix 7500 (Германия), предназначенным для измерения толщины покрытия на ферромагнитных и неферромагнитных поверхностях. Для экспериментов использовался измерительный комплекс Nano Test 600 (Великобритания). Приводятся основные характеристики этого комплекса, его техническое описание, рассматривается перечень работ, которые можно проводить на этом комплексе. Предлагается методика и программа проведения экспериментов.

В работе использовались различные типы инденторов (пирамида Берковича, конус со сферическим наконечником и другие). Проводилась топография поверхности лакокрасочных покрытий. Компьютерная система комплекса Nano Test 600 определяла: максимальную глубину проникновения индентора, пластическую деформацию, твердость покрытия по Бринеллю, приведенный модуль упругости (модуль упругости системы: образец + индентор), упругое восстановление, податливость