

ЗАРОЖДЕНИЕ КОГЕЗИОННОЙ ТРЕЩИНЫ В ТОРМОЗНОМ БАРАБАНЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ш.Г. Гасанов, С.А. Аскеров

Азербайджанский Технический Университет

При скоростном торможении автомобиля в сравнительно короткий промежуток времени выделяется значительное количество тепла, что приводит к чрезмерному нагреву барабана тормозного механизма и потере тормозного момента. Также на напряженно-деформированное состояние тормозного барабана влияет его неравномерный нагрев. При длительном торможении температурные напряжения имеют весьма важное значение для тормозного механизма автомобиля. Поэтому для надежности тормозного механизма и безопасности транспортного средства особо важно прогнозировать трещинообразование в тормозном барабане при торможении учитывая температурные напряжения.

Будем рассматривать тормозной барабан, внутренний контур которого близок к круговому, как однородное изотропное тело. Известно, что его реальная поверхность не бывает абсолютно гладкой, так как имеет микро- и макроскопические неровности технологического характера, образующие шероховатость. При повторно-кратковременном режиме торможения тормозной барабан подвергается многократному циклическому нагружению. При этом в материале барабана возникают концентраторы напряжений (области ослабленных межчастичных связей материала). Принято, что в областях ослабленных межчастичных связей материала осуществляется неупругое деформирование.

Через некоторое число циклов нагружений (торможений) возможность деформирования исчерпывается, и раскрытие берегов области ослабленных межчастичных связей материала резко возрастает.

Когда раскрытие берегов зоны предразрушения достигает предельного для материала барабана значения δ_c , происходит зарождение [1] усталостной трещины. Взаимодействие берегов зоны предразрушения будем моделировать силами сцепления между берегами. Следовательно, область зарождения когезионной трещины в барабане рассматриваем как зону предразрушения (зону ослабленных межчастичных связей материала). Размер зоны ослабленных межчастичных связей зависит от вида материала тормозного барабана. Он заранее неизвестен и определяется в ходе решения поставленной задачи, также как и местоположение зоны предразрушения.

1. Mirsalimov V. M. The solution of a problem in contact fracture mechanics on the nucleation and development of a bridged crack in the hub of a friction pair. *J. of Appl. Math. Mech.* 2007. Vol. 71, Iss. 1. P. 120–136. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2007.03.003>

Зона предразрушения мала относительно остальной части барабана и ее можно мысленно заменить разрезом, поверхности которого взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. Поэтому зарождение когезионной трещины в поставленной задаче представляет собой переход зоны предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала тормозного барабана.

Считается, что на начальном этапе образования зоны предразрушения, ее размеры гораздо меньше толщины барабана. Принято, что выполняются условия плоской деформации. Отнесем тормозной барабан к полярной системе координат $r\theta$ и рассмотрим некоторую произвольную реализацию шероховатости внутренней поверхности барабана.

Представим границу внутренней окружности в виде $\rho(\theta) = R_0 + \varepsilon H(\theta)$, где ε – малый параметр.

Так как при торможении автомобиля из-за внешнего трения в зоне контакта с фрикционной накладкой действует поверхностный источник тепла (на внутренней поверхности барабана), температура барабана повышается. Температурное поле в тормозном барабане в системе координат, совершающей вращательное перемещение, описывается уравнением теории теплопроводности при граничных условиях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -Q(\theta) \quad \text{на площадке,} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha_1 (T - T_c) = 0 \quad \text{вне площадки контакта,}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha_2 (T - T_c) = 0 \quad \text{на внешней поверхности барабана.}$$

Коэффициенты теплопроводности материала барабана в осевом, окружном и радиальном направлении приняты одинаковыми и независимыми от координат и температуры.

Краевые условия задачи о температурных напряжениях в тормозном барабане с зоной предразрушения будут иметь вид:

$$\sigma_n = 0, \quad \tau_{nt} = 0 \quad \text{при } r = \rho(\theta), \quad (1)$$

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } r = R_1, \quad (2)$$

$$\sigma_{y_1} = q_{y_1}, \quad \tau_{x_1 y_1} = q_{x_1 y_1} \quad \text{на берегах зоны предразрушения,}$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ – компоненты тензора напряжений; q_{y_1} и $q_{x_1 y_1}$ – неизвестные пока усилия в связях между берегами зоны предразрушения.

В постановке задачи (1), (2) не хватает соотношения, связывающего раскрытие берегов зоны предразрушения и напряжения в связях:

$$\left(v_1^+ - v_1^-\right) - i\left(u_1^+ - u_1^-\right) = \Pi_y(x_1, q_{y_1})q_{y_1}(x_1) - i\Pi_x(x_1, q_{x_1 y_1})q_{x_1 y_1}(x_1). \quad (3)$$

Температуру $t = T - T_c$ ищем в виде разложения по малому параметру

$$t = t^{(0)} + \varepsilon t^{(1)} + \dots,$$

в котором пренебрегаем членами, содержащими малый параметр ε в степени выше первой. Каждое из приближений удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности.

Используя метод возмущений, краевая задача теории теплопроводности сводится к последовательности граничных задач, которые в каждом приближении решаются методом разделения переменных.

После решения краевой задачи теории теплопроводности в каждом приближении находим $t^{(0)}(r, \theta)$ и $t^{(1)}(r, \theta)$. Напряжения и перемещения в тормозном барабане, вызванные неравномерным нагревом, и другие неизвестные задачи ищем в виде разложений по малому параметру. Значения компонент тензора напряжений при $r = \rho(\theta)$ находим, разлагая в ряд выражения для напряжений в окрестности при $r = R_0$.

С помощью метода возмущений, получаем последовательность краевых задач о температурных напряжениях для тормозного барабана с круговыми границами. Для решения задачи термоупругости в каждом приближении используем термоупругий потенциал перемещений. Термоупругий потенциал перемещений определяется уравнениями

$$\Delta F^{(0)} = \beta t^{(0)}, \quad \Delta F^{(1)} = \beta t^{(1)}, \quad (4)$$

Уравнения (3) решались методами разделения переменных и вариации постоянных. Температурные функции $t^{(0)}(r, \theta)$ и $t^{(1)}(r, \theta)$ берутся из решения задачи теории теплопроводности в виде рядов Фурье. Вычисляя функцию $F^{(0)}(r, \theta)$ по известным формулам находим напряжения $\bar{\sigma}_r^{(0)}$, $\bar{\sigma}_\theta^{(0)}$, $\bar{\tau}_{r\theta}^{(0)}$ в нулевом приближении. Граничные условия термоупругого напряженного состояния, обусловленного действием неравномерного температурного поля в тормозном барабане, в нулевом приближении при этом не будут удовлетворены. Требуется найти второе напряженное состояние $\bar{\bar{\sigma}}_r^{(0)}$, $\bar{\bar{\sigma}}_\theta^{(0)}$, $\bar{\bar{\tau}}_{r\theta}^{(0)}$. Комплексные потенциалы, описывающие второе напряженное состояние, ищем в виде

$$\begin{aligned}\Phi^{(0)}(z) &= \Phi_0^{(0)}(z) + \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z), \\ \Psi^{(0)}(z) &= \Psi_0^{(0)}(z) + \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z).\end{aligned}\tag{5}$$

Удовлетворяя функциями (5) граничному условию на берегах зоны предразрушения, получаем комплексное сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции, которая характеризует раскрытие берегов зоны предразрушения в нулевом приближении

$$g_1^{(0)}(x_1) = \frac{2G}{i(1+\kappa)} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[u_1^{(0)+}(x_1, 0) - u_1^{(0)-}(x_1, 0) + i \left(v_1^{(0)+}(x_1, 0) - v_1^{(0)-}(x_1, 0) \right) \right],$$

где $\kappa = 3 - 4\mu$; G – модуль сдвига материала барабана.

Для внутренней зоны предразрушения необходимо к сингулярному интегральному уравнению добавить условие, которое обеспечивает однозначность смещений при обходе контура зоны предразрушения.

Требуя, чтобы функции (5) удовлетворяли граничным условиям задачи, получаем бесконечную систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_k, b_k потенциалов $\Phi_0^{(0)}(z)$ и $\Psi_0^{(0)}(z)$.

С помощью процедуры алгебраизации сингулярное интегральное уравнение при дополнительном условии сводим к системе M алгебраических уравнений для определения M неизвестных $g_1^{(0)}(t_m)$. Переходя к комплексно-сопряженным величинам, получаем еще M алгебраических уравнений. В правые части полученной системы входят неизвестные значения нормальных $q_{y_1}^{(0)}(x_1)$ и касательных $q_{x_1 y_1}^{(0)}(x_1)$ напряжений в узловых точках разбиения концевых зон трещины. Условием, определяющим неизвестные напряжения в связях между берегами в концевых зонах трещины, служит дополнительное соотношение (3) в нулевом приближении.

Используется метод конечных разностей. В результате получена комплексная алгебраическая система из M уравнений для определения приближенных значений $q_{y_1}^{(0)}(t_m)$ и $q_{x_1 y_1}^{(0)}(t_m)$ в узловых точках зоны предразрушения. Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает двух комплексных уравнений для определения местоположения вершин зоны предразрушения. Записывая условия конечности напряжений в вершинах зоны предразрушения, находим недостающие уравнения.

Из-за неизвестных местоположения и размера зоны предразрушения полученная алгебраическая система нелинейна. Ее численное решение позволяет найти координаты вершин (местоположение) и размер зоны предразрушения, напряженно-деформированное состояние тормозного барабана в нулевом приближении. После решения объединенной алгебраической системы переходим к построению решения задачи в первом приближении.

Для прогнозирования предельного состояния тормозного барабана, в котором появится когезионная трещина, используем критерий критического раскрытия берегов зоны предразрушения. Используя полученное решение, находим предельное условие, при котором в барабане появится когезионная трещина:

$$\frac{1 + \kappa}{2G} \frac{\pi d_1}{M} \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = \delta_c, \quad (6)$$

Совместное решение полученных уравнений с условием (б) позволяет при заданных характеристиках материала тормозного барабана прогнозировать критическое значение контактного давления и размеры зоны предразрушения для состояния предельного равновесия.

Представленная расчетная модель позволяет на этапе проектирования барабанного колодочного тормоза грузового автомобиля устанавливать значения рабочих нагрузок, при которых тормоз имеет достаточный запас надежности; определять допустимый уровень дефектности и гарантированный ресурс барабана; подбирать для тормозного барабана материал, обладающий требуемым набором статических и циклических характеристик трещиностойкости. Выбор параметров барабана тормозного механизма на этапе проектирования должен учитывать следующее условие: интенсивность теплового воздействия при торможении не должна быть выше критического значения, вызывающего появление в барабане когезионной трещины.

Спасибо за внимание