

Э. И. Зульфугаров

Азербайджанский  
технический университет,  
г. Баку, Азербайджан,  
e-mail:  
sopromat-v@mail.ru

УДК 539.375

## ТЕРМОУПРУГОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ТОРМОЗНОМ БАРАБАНЕ С ЗОНОЙ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

**Ключові слова:** гальмівний барабан колесної машини, зона передруйнування, термопружний напружений стан, тріциноутворення.

*Розроблено розрахункову модель, в рамках якої описується тріциноутворення у барабані гальмівного механізму під дією температурних напружень під час гальмування автомобіля. Взаємодія берегів зони передруйнування моделюється введенням між ними ліній пластичного ковзання. Отримано співвідношення для визначення критичного значення інтенсивності теплової дії, за якої у барабані гальмівного механізму відбудеться тріциноутворення.*

### Введение

Скоростной режим торможения автомобиля сопровождается выделением значительного количества тепла в сравнительно короткий промежуток времени. Это приводит к нагреву металлического барабана и потере тормозного момента. Таким образом, для колесного барабанного тормоза температурные напряжения играют решающую роль при длительных торможениях. Для обеспечения безопасности транспортных средств на стадии проектирования важное значение имеет разработка расчетной модели, в рамках которой можно было бы эффективно прогнозировать появление дефектов типа трещин в барабане тормозного механизма в процессе торможения колесной машины.

### Постановка задачи

При повторно-кратковременном режиме торможения транспортного средства барабан тормозного механизма автомобиля испытывает многократное циклическое нагружение. Считается, что при этом в материале барабана будут возникать концентраторы напряжений (области ослабленных межчастичных связей материала). При нагружении в нем (прослойки перенапряженного материала) образуются зоны пластического течения. Пусть для определенности нагрузка изменяется так, что в областях ослабленных межчастичных связей материала осуществляется пластическое деформирование. Через некоторое число циклов нагружений (торможений) возможность пластического деформирования в области ослабленных межчастичных связей материала исчерпывается и раскрытие берегов зоны пластического течения резко возрастает. Если раскрытие берегов зоны предразрушения в точке максимальной концентрации достигает предельного значения  $\delta_c$  для данного материала тормозного барабана, то в этой точке зарождается [1] усталостная трещина.

По мере эксплуатации фрикционной пары «барабан–накладка» колесной машины в барабане будет возникать зона предразрушения, которая моделируется как область ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется путем введения между ее берегами сил сцепления (вырожденная полоса пластических деформаций). Размеры зоны пластического течения материала при постоянном напряжении (усилии сцепления материала) зависят от вида материала. Таким образом, зону зарождения трещины моделируем зоной предразрушения (зоной ослабленных межчастичных связей материала).

Тормозной барабан моделируем изотропным однородным телом. Принято, что внутренний контур барабана близок к круговому. Как известно, реальная поверхность барабана никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет микро- и макроскопические неровности технологического характера, образующие шероховатость. Несмотря на исключительно малые размеры неровностей, образующих шероховатость, они оказывают существенное влияние [2, 3] на различные эксплуатационные свойства.

Отнесем тормозной барабан к полярной системе координат  $r\theta$ , выбрав начало координат в центре концентрических окружностей  $L_0, L$  с радиусами  $R_0$  и  $R$  (рис. 1).

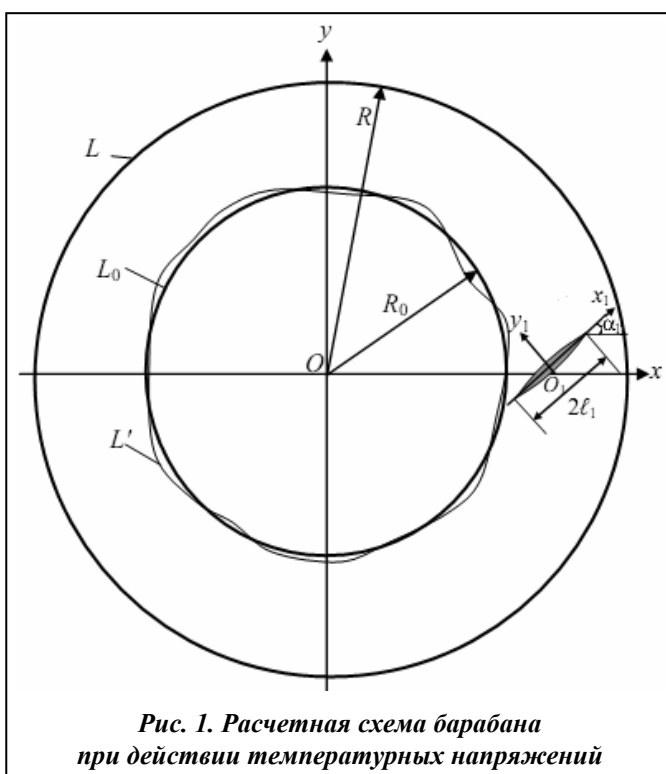


Рис. 1. Расчетная схема барабана при действии температурных напряжений

Рассмотрим некоторую произвольную реализацию шероховатости внутренней поверхности тормозного барабана. Представим границу внутреннего контура  $L'$  в виде

$$\rho(\theta) = R_0 + \varepsilon H(\theta),$$

где  $\varepsilon = R_{\max}/R$  – малый параметр;  $R_{\max}$  – наибольшая высота выступа (впадины) неровности внутренней поверхности барабана.

Одной из причин появления напряжений и деформаций в тормозном барабане является его неравномерный нагрев. При торможении колесной машины на внутренней поверхности барабана на площадке контакта с фрикционной накладкой действует поверхностный источник тепла, вызванный внешним трением.

В результате такого взаимодействия происходит повышение температуры барабана. Так как зона предразрушения (прослойка «перенапряженного» материала) мала по сравнению с остальной частью тормозного барабана, ее можно мысленно удалить, заменив разрезом, поверхности которой взаимодействуют между

собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. В исследуемом случае трещинообразование представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала барабана.

Считаем, что зона ослабленных связей материала ориентирована в направлении действия максимальных растягивающих напряжений, возникающих в тормозном барабане при торможении. Размер зоны предразрушения заранее неизвестен и должен быть определен при решении задачи.

В центре зоны предразрушения разместим начало локальной системы координат  $x_1 O_1 y_1$ , ось  $x_1$  которой совпадает с линией зоны предразрушения и образует угол  $\alpha_1$  с осью  $Ox$  ( $\theta = 0$ ) (рис. 1). Принято, что в начальной стадии образования зоны ослабленных межчастичных связей материала ее размеры гораздо меньше толщины тормозного барабана. Считается, что выполняются условия плоской деформации.

### Метод решения и анализ

Температурное поле в барабане в системе координат, совершающей вращательное перемещение, описывается уравнением теории теплопроводности

$$\Delta T + \frac{\omega}{a} \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$$

при граничных условиях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -Q(\theta) \quad \text{на контактной площадке}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha_1 (T - T_c) = 0 \quad \text{вне контактной площадки}$$

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

Здесь  $T(r, \theta)$  – температурная функция;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\lambda$  – теплопроводность материала барабана;  $a$  – температуропроводность материала барабана;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи с внутренней цилиндрической поверхности барабана с температурой окружающей среды  $T_c$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент те-

плоотдачи с внешней цилиндрической поверхности барабана;  $n$  – нормаль к контуру барабана;  $Q(\theta)$  – интенсивность поверхностного источника тепла, приходящаяся на барабан;  $\omega$  – угловая скорость вращения барабана в момент торможения автомобиля.

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

Используя метод возмущений, краевая задача теории теплопроводности сводится к последовательности граничных задач. В каждом приближении граничная задача решается методом разделения переменных.

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

$$\begin{aligned} \sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad \text{при } r = \rho(\theta) \\ \sigma_r = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{при } r = R \\ \sigma_{y_1} = \sigma_s; \quad \tau_{x_1y_1} = \tau_s \quad \text{на берегах зоны предразрушения,} \end{aligned}$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_s$  и  $\tau_s$  – пределы текучести материала при растяжении и сдвиге соответственно.

Напряжения и перемещения в барабане от действия неравномерного нагрева ищем в виде разложений по малому параметру, в которых пренебрегаем, для упрощения, членами, содержащими  $\varepsilon$  в степени выше первой. Значения компонент тензора напряжений при  $r = \rho(\theta)$  получим, разлагая в ряд выражения для напряжений в окрестности при  $r = R_0$ .

Применяя метод возмущений для краевой задачи о температурных напряжениях, имеем последовательность граничных задач для тормозного барабана с круговыми границами.

Граничные условия задачи в нулевом приближении будут

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(0)} = 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0 \quad \text{при } r = R_0 \\ \sigma_r^{(0)} = 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0 \quad \text{при } r = R \\ \sigma_{y_1}^{(0)} = \sigma_s; \quad \tau_{x_1y_1}^{(0)} = \tau_s \quad \text{при } |x_1| \leq \ell_1^0 \end{aligned} \quad (1)$$

Для первого приближения граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)} = N_1; \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = T_1 \quad \text{при } r = R_0 \\ \sigma_r^{(1)} = 0; \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = 0 \quad \text{при } r = R \\ \sigma_{y_1}^{(1)} = 0; \quad \tau_{x_1y_1}^{(1)} = 0 \quad \text{при } |x_1| \leq \ell_1^1, \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $N_1 = -H(\theta) \frac{\partial \sigma_r^{(0)}}{\partial r} + 2\tau_{r\theta}^{(0)} \frac{1}{R_0} \frac{dH}{d\theta}$  при  $r = R_0$

$$T_1 = (\sigma_\theta^{(0)} - \sigma_r^{(0)}) \frac{1}{R_0} \frac{dH}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(0)}}{\partial r}.$$

Для построения решения задачи термоупругости в каждом приближении используем термоупругий потенциал перемещений [4], который определяется следующими уравнениями:

$$\Delta F^{(0)} = \beta T^{(0)}, \quad \Delta F^{(1)} = \beta T^{(1)}, \quad (3)$$

где  $\beta = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала барабана;  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $T^{(j)}$  – температурная функция в нулевом ( $j = 0$ ) и первом ( $j = 1$ ) приближениях.

Температурные функции  $T^{(0)}(r, \theta)$  и  $T^{(1)}(r, \theta)$  берутся в виде рядов Фурье из решения задачи теории теплопроводности. Для решения уравнений (3) использовали методы разделения переменных и вариации постоянных. После определения  $F^{(0)}(r, \theta)$  по известным формулам [4] вычисляем соответствующие напряжения  $\bar{\sigma}_r^{(0)}, \bar{\sigma}_\theta^{(0)}, \bar{\tau}_{r\theta}^{(0)}$  в нулевом приближении. Найденные напряжения не будут

удовлетворять граничным условиям (1) термоупругого напряженного состояния, возникающего от действия неравномерного температурного поля в тормозном барабане в нулевом приближении. Поэтому необходимо найти второе напряженное состояние  $\bar{\sigma}_r^{(0)}$ ,  $\bar{\sigma}_\theta^{(0)}$ ,  $\bar{\tau}_{r\theta}^{(0)}$ .

Граничные условия задачи для отыскания второго напряженного состояния в нулевом приближении примут следующий вид:

$$\bar{\sigma}_r^{(0)} = -\bar{\sigma}_r^{(0)}; \quad \bar{\tau}_{r\theta}^{(0)} = -\bar{\tau}_{r\theta}^{(0)} \quad \text{при } r = R_0 \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_r^{(0)} = -\bar{\sigma}_r^{(0)}; \quad \bar{\tau}_{r\theta}^{(0)} = -\bar{\tau}_{r\theta}^{(0)} \quad \text{при } r = R$$

$$\bar{\sigma}_{y_1}^{(0)} = \sigma_s - \bar{\sigma}_{y_1}^{(0)}; \quad \bar{\tau}_{x_1 y_1}^{(0)} = \tau_s - \bar{\tau}_{x_1 y_1}^{(0)} \quad \text{при } |x_1| \leq \ell_1^0. \quad (5)$$

Используя формулы Колосова–Мухелишвили [5], граничные условия задачи (4)–(5) можно записать как краевую задачу для отыскания двух комплексных потенциалов  $\Phi^{(0)}(z)$  и  $\Psi^{(0)}(z)$ .

Комплексные потенциалы, описывающие второе напряженное состояние, ищем в виде

$$\Phi^{(0)}(z) = \Phi_0^{(0)}(z) + \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z), \quad (6)$$

$$\Psi^{(0)}(z) = \Psi_0^{(0)}(z) + \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z),$$

где

$$\Phi_0^{(0)}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k z^k; \quad \Psi_0^{(0)}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k z^k; \quad (7)$$

$$\Phi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \frac{g_1^0(t) dt}{t - z_1};$$

$$\Psi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} e^{-2i\alpha_1} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[ \frac{\overline{g_1^0(t)}}{t - z_1} - \frac{\bar{T}_1 e^{i\alpha_1}}{(t - z_1)^2} g_1^0(t) \right]; \quad (8)$$

$$\Phi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[ \left( -\frac{1}{z} - \frac{\bar{T}_1}{1 - z\bar{T}_1} \right) e^{i\alpha_1} g_1^0(t) + \overline{g_1^0(t)} e^{-i\alpha_1} \frac{1 - T_1 \bar{T}_1}{\bar{T}_1 (1 - z\bar{T}_1)^2} \right] dt;$$

$$\Psi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi z} \int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left\{ g_1^0(t) e^{i\alpha_1} \left[ \frac{1}{z\bar{T}_1} - \frac{2}{z^2} - \frac{\bar{T}_1}{z(1 - z\bar{T}_1)} + \frac{\bar{T}_1^2}{(1 - z\bar{T}_1)^2} \right] + \right. \\ \left. + e^{-i\alpha_1} g_1^0(t) \left[ \frac{1 - T_1 \bar{T}_1}{z\bar{T}_1 (1 - z\bar{T}_1)^2} - \frac{1}{1 - zT_1} - \frac{2(1 - T_1 \bar{T}_1)}{(1 - z\bar{T}_1)^3} \right] \right\} dt,$$

$$T_1 = t e^{i\alpha_1} + z_1^0; \quad z_1 = e^{-i\alpha_1} (z - z_1^0).$$

Здесь  $g_1^0(t)$  – искомая функция, характеризующая раскрытие берегов зоны предразрушения в нулевом приближении

$$g_1^0(x_1) = \frac{2G}{i(1 + \kappa_0)} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ u_1^+(x_1, 0) - u_1^-(x_1, 0) + i(v_1^+(x_1, 0) - v_1^-(x_1, 0)) \right],$$

$G$  – модуль сдвига материала барабана;  $\kappa_0 = 3 - 4\mu$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала барабана.

Удовлетворяя функциями (6) краевому условию на берегах зоны предразрушения, получим комплексное сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции  $g_1^0(x_1)$

$$\int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} \left[ R(t, x_1) g_1^0(t) + S(t, x_1) \overline{g_1^0(t)} \right] dt = \pi f^0(x_1) \quad |x_1| \leq \ell_1^0, \quad (9)$$

$$f^0(x) = -(\sigma_s - i\tau_s) - (\overline{\sigma_{y_1}^{(0)}} - i\overline{\tau_{x_1 y_1}^{(0)}}) - \left[ \Phi_0^{(0)}(x) + \overline{\Phi_0^{(0)}(x)} + x\overline{\Phi_0^{\prime(0)}(x)} + \overline{\Psi_0^{(0)}(x)} \right],$$

$$R(t, x_1) = \frac{e^{i\alpha_1}}{2} \left( \frac{1}{T_1 - X_1} + \frac{e^{-2i\alpha_1}}{T_1 - \overline{X_1}} \right) + \frac{e^{i\alpha_1}}{2} \left( \frac{1}{X_1(X_1 \overline{T_1} - 1)} + \frac{1 - T_1 \overline{T_1}}{T_1(1 - T_1 \overline{X_1})^2} \right) + e^{-2i\alpha_1} \left[ \frac{(T_1 \overline{T_1} - 1)(2X_1 T_1 \overline{X_1}^2 - 3\overline{X_1} T_1 + 1) + T_1 \overline{X_1} (1 - \overline{X_1} T_1)^2}{T_1 \overline{X_1}^2 (T_1 \overline{X_1} - 1)^3} \right],$$

$$S(t, x_1) = \frac{e^{-i\alpha_1}}{2} \left( \frac{1}{\overline{T_1} - \overline{X_1}} + \frac{T_1 - X_1}{(\overline{T_1} - \overline{X_1})^2} e^{-2i\alpha_1} \right) + \frac{e^{-i\alpha_1}}{2} \left\{ \frac{1}{X_1(T_1 X_1 - 1)} + \frac{1 - T_1 \overline{T_1}}{T_1(1 - X_1 \overline{T_1})^2} + e^{-2i\alpha_1} \left[ \frac{1}{\overline{T_1} X_1^2} + \frac{X_1 \overline{X_1} (1 - 2\overline{X_1} T_1) + 3\overline{X_1} T_1 - 2}{X_1^3 (1 - \overline{X_1} T_1)^2} \right] \right\}, \quad X_1 = x_1 e^{i\alpha_1} + z_1^0.$$

К сингулярному интегральному уравнению для внутренней зоны предразрушения необходимо добавить дополнительное равенство

$$\int_{-\ell_1^0}^{\ell_1^0} g_1^{(0)}(t) dt = 0, \quad (10)$$

обеспечивающее однозначность смещений при обходе контура зоны предразрушения.

Требую выполнения граничных условий (4), записанных через комплексные потенциалы функциями (6), получаем после некоторых преобразований бесконечную систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $a_k, b_k$  потенциалов  $\Phi_0^{(0)}(z)$  и  $\Psi_0^{(0)}(z)$ .

Сингулярное интегральное уравнение (9) при дополнительном условии (10) с помощью процедуры алгебраизации [6] сводится к системе  $M$  алгебраических уравнений для определения  $M$  неизвестных  $g_1^{(0)}(t_m)$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ )

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \ell_1^0 \left[ g_1^{(0)}(t_m) R(\ell_1^0 t_m, \ell_1^0 x_r) + \overline{g_1^{(0)}(t_m)} S(\ell_1^0 t_m, \ell_1^0 x_r) \right] = f^0(x_r) \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M g_1^{(0)}(t_m) = 0, \quad r = 1, 2, \dots, M-1,$$

где  $t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ );  $x_r = \cos \frac{\pi r}{M}$  ( $r = 1, 2, \dots, M-1$ ).

Если в системе (11) перейти к комплексно-сопряженным величинам, получим еще  $M$  алгебраических уравнений. Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает двух комплексных уравнений для определения размеров зоны предразрушения.

Записывая условия конечности напряжений в вершинах зоны предразрушения, находим еще два недостающих уравнения в виде

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_1^{(0)}(t_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0, \quad \sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_1^{(0)}(t_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0.$$

После решения объединенной алгебраической системы перейдем к построению решения задачи в первом приближении. На основании полученного решения находим компоненты напряжений

$$\sigma_r^{(0)} = \bar{\sigma}_r^{(0)} + \overline{\bar{\sigma}}_r^{(0)}; \quad \sigma_\theta^{(0)} = \bar{\sigma}_\theta^{(0)} + \overline{\bar{\sigma}}_\theta^{(0)}; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = \bar{\tau}_{r\theta}^{(0)} + \overline{\bar{\tau}}_{r\theta}^{(0)}$$

в тормозном барабане в нулевом приближении.

При  $r = R_0$  находим функции  $N_1$  и  $T_1$ . С помощью термоупругого потенциала перемещений  $F^{(1)}(r, \theta)$  в первом приближении находим компоненты тензора напряжения  $\bar{\sigma}_r^{(1)}$ ,  $\bar{\sigma}_\theta^{(1)}$ ,  $\bar{\tau}_{r\theta}^{(1)}$ . Найденные напряжения  $\bar{\sigma}_r^{(1)}$ ,  $\bar{\sigma}_\theta^{(1)}$ ,  $\bar{\tau}_{r\theta}^{(1)}$  не будут удовлетворять граничным условиям (2) первого приближения. Следовательно, необходимо отыскать второе вспомогательное напряженное состояние  $\overline{\bar{\sigma}}_r^{(1)}$ ,  $\overline{\bar{\sigma}}_\theta^{(1)}$ ,  $\overline{\bar{\tau}}_{r\theta}^{(1)}$ , такое, чтобы выполнялись граничные условия

$$\begin{aligned} \overline{\bar{\sigma}}_r^{(1)} &= N_1 - \bar{\sigma}_r^{(1)}; & \overline{\bar{\tau}}_{r\theta}^{(1)} &= T_1 - \bar{\tau}_{r\theta}^{(1)} & \text{при } r = R_0 \\ \overline{\bar{\sigma}}_r^{(1)} &= -\bar{\sigma}_r^{(1)}; & \overline{\bar{\tau}}_{r\theta}^{(1)} &= -\bar{\tau}_{r\theta}^{(1)} & \text{при } r = R \\ \overline{\bar{\sigma}}_{y_1}^{(1)} &= -\bar{\sigma}_{y_1}^{(1)}; & \overline{\bar{\tau}}_{x_1 y_1}^{(1)} &= -\bar{\tau}_{x_1 y_1}^{(1)} & \text{при } |x_1| \leq \ell_1^1, \end{aligned} \tag{12}$$

С помощью формул Колосова–Мусхелишвили [5] граничные условия (12) записываются в виде краевой задачи для определения комплексных потенциалов  $\Phi^{(1)}(z)$  и  $\Psi^{(1)}(z)$ . Комплексные потенциалы  $\Phi^{(1)}(z)$  и  $\Psi^{(1)}(z)$ , описывающие второе вспомогательное напряженное состояние первого приближения, ищутся в виде аналогично (6)–(8) с очевидными изменениями. Дальнейший ход решения задачи такой же, как в нулевом приближении. После определения искомых величин для прогнозирования предельного состояния тормозного барабана, когда может появиться трещина, используем критерий критического раскрытия берегов полосы предразрушения

$$|(u^+ - u^-) - i(v^+ - v^-)| = \delta_c,$$

где  $\delta_c$  – характеристика сопротивления материала барабана трещинообразованию.

Используя полученное решение, находим предельное условие, при котором возникает трещина в виде

$$\frac{1 + \kappa_0}{2G} \frac{\pi \ell_1}{M} \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = \delta_c, \tag{13}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum_{m=1}^{M_1} [v_1^0(t_m) + \varepsilon v_1^1(t_m)], \\ B_1 &= \sum_{m=1}^{M_1} [u_1^0(t_m) + \varepsilon u_1^1(t_m)], \end{aligned}$$

где  $M_1$  – число узловых точек в отрезке  $(-\ell_1, x_0)$ .

Совместное решение полученных уравнений с критерием (13) позволяет при заданных характеристиках материала барабана прогнозировать критическую величину контактного давления и размеры зоны предразрушения для состояния предельного равновесия.

Полученные системы решались для разных значений  $M$ . Полагалось  $M = 20$ ;  $M = 40$ , что означает разбиение интервала интегрирования  $[-1, 1]$  на 20, 40 чебышевских узлов соответственно. Расчеты выполнялись применительно к тормозным механизмам грузового автомобиля КамАЗ–5320. Численный расчет показывает, что наибольшие температурные напряжения возникают на поверхности трения.

На рис. 2 представлены графики за-

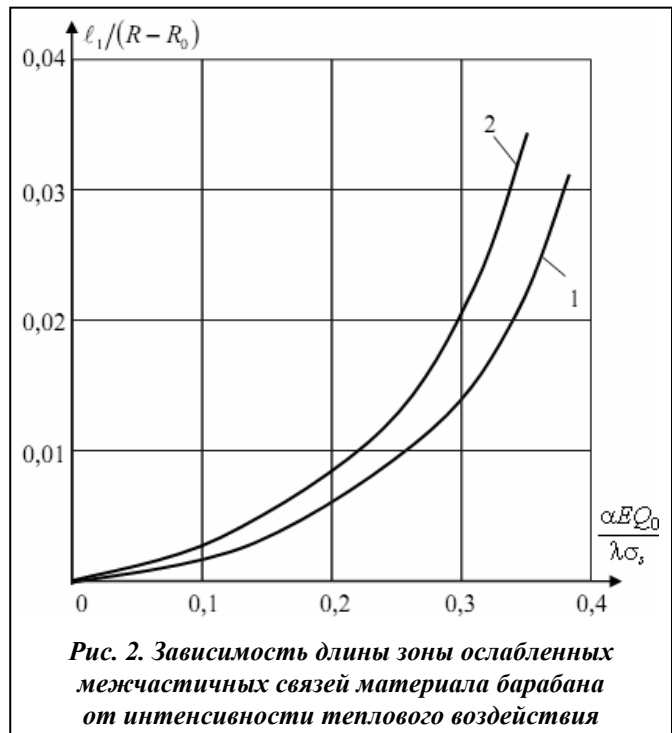
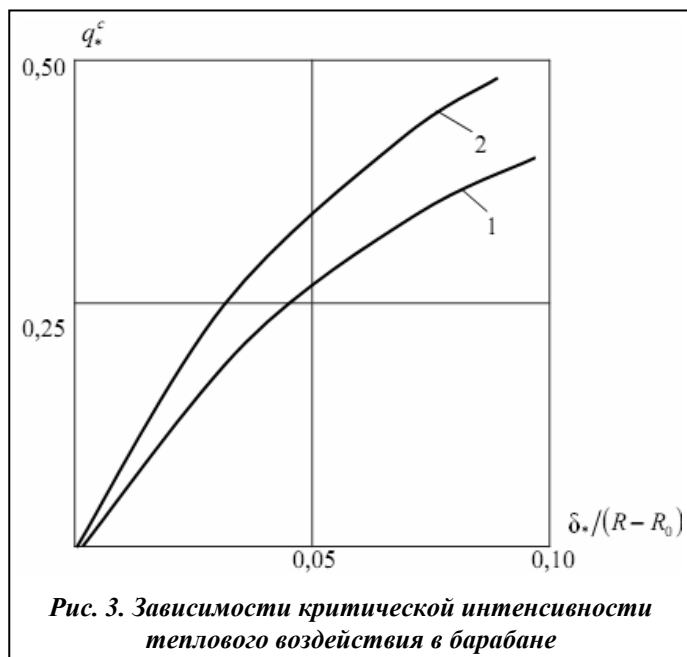


Рис. 2. Зависимость длины зоны ослабленных межчастичных связей материала барабана от интенсивности теплового воздействия



в зависимости длины зоны ослабленных межчастичных связей материала  $\ell_1/(R - R_0)$  от интенсивности теплового воздействия  $q_* = \frac{\alpha E Q_0}{\lambda \sigma_s}$ ,

где  $Q_0 = Q(p_0)$ . Кривая 1 соответствует гладкой поверхности трения барабана, а кривая 2 – шероховатой поверхности трения тормозного барабана. На рис. 3 представлены графики безразмерной критической  $q_*^c$  интенсивности теплового воздействия в барабане от относительного раскрытия  $\delta_*/(R - R_0)$  берегов зоны предразрушения в ее центре, при этом кривая 1 соответствует гладкой поверхности трения барабана. Здесь  $\delta_* = \frac{\pi G \delta_c}{(1 + \kappa_0) \sigma_s}$ .

На основании полученных результатов можно предложить следующие практические рекомендации. При проектировании тормозной системы барабанного колодочного тормоза грузового автомобиля необходимо так выбрать параметры тормозного механизма, чтобы максимальная интенсивность теплового воздействия при торможении автомобиля не превышала критического значения интенсивности теплового воздействия, вызывающего трещинообразование в барабане. Это условие можно записать в виде  $q_{*max} < q_*^c$ , где

$q_{*max}$  – максимальная интенсивность теплового воздействия в проектируемом тормозном механизме колесной машины.

### Выводы

Разработанная расчетная модель позволяет на стадии проектирования решать следующие практически важные задачи:

- оценивать гарантированный ресурс тормозного барабана с учетом ожидаемых дефектов и условий нагружения;
- установить допустимый уровень дефектности и максимальные значения рабочих нагрузок, обеспечивающие достаточный запас надежности;
- проводить выбор материала с необходимым комплексом статических и циклических характеристик трещиностойкости.

### Литература

1. Мирсалимов, В. М. Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В. М. Мирсалимов // Мат. моделирование. – 2005. – Т. 17, № 2. – С. 35–45.
2. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов – М.: Машиностроение. 1981. – 244 с.
3. Thomas, T. R. Rough surfaces / T. R. Thomas. – London: Longman. 1982. – 387 p.
4. Паркус, Г. Неуставившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М.: Физматлит, 1963. – 252 с.
5. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
6. Панасюк, В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацышин. – Киев: Наук. думка, 1976. – 443 с.

Поступила в редакцию 03.03.14