

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ОТ ТРЕНИЯ

Чебаков М.И., Ляпин А.А., Колесников И.В.

INTERACTION BETWEEN THE BRAKE PADS AND RAILWAY WHEEL IN THE PRESENCE OF HEAT FROM FRICTION

Chebakov M.I., Lyapin A.A., Kolesnikov I.V.

На стадии торможения в процессе движения железнодорожного вагона происходит сложное взаимодействие колес с тормозными колодками, приводящее как к нагреву колодок, так и колес. Основным источником возникновения тепловых потоков на колесах и тормозных колодках является трение в зонах контакта колес и колодок.

Поставлена и исследована нестационарная термоупругая контактная задача, моделирующая взаимодействие тормозной колодки и железнодорожного колеса с учетом вращения колеса по достаточно произвольному закону. На всех границах колеса и тормозной рычажной передачи вне областей контакта заданы условия отсутствия внешних усилий и задан свободный теплообмен с окружающей средой. В зоне контакта колодки и колеса задано Кулоновское трение, возбуждающее температурные поля во всей системе. Проведены расчеты температурных полей в моделируемой системе при некоторых геометрических и физико-механических параметрах задачи.

Ключевые слова: тормозная колодка, трение, тепловыделение от трения, термоупругость, математическое моделирование, контактное взаимодействие.

Постановка задачи. В качестве модели контактного взаимодействия тормозной колодки и железнодорожного колеса рассмотрим плоскую систему тел, состоящую из колеса, тормозной колодки, башмака, втулки и цилиндра, нагруженного прижимающей колодку к колесу силой P (рис. 1). Отметим, что температурные поля в тормозной колодке при ее взаимодействии с колесом изучались, например, в [1].

Для описания данной системы тел воспользуемся уравнениями связанной термоупругости для каждого тела, которые можно представить в виде [2]:

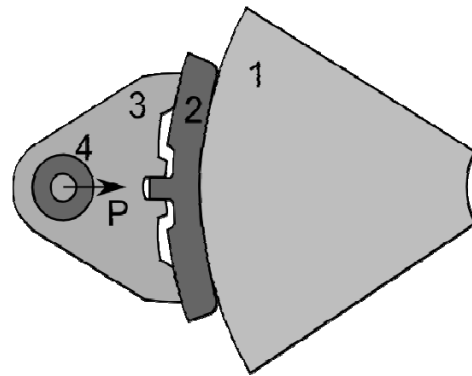
$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \{\sigma\} + \{\alpha\} \Delta T;$$

$$S = \{\alpha\}^T \{\sigma\} + \frac{\rho C_p}{T_0} \Delta T \text{ или}$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} + \{\beta\} \Delta T;$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = T_0 \{\beta\}^T \frac{\partial \{\varepsilon\}}{\partial t} + \rho C_V \frac{\partial (\Delta T)}{\partial t} - [K] \nabla^2 T \quad (1)$$

где $\{\varepsilon\}$ - вектор деформации, D - матрица упругой жесткости, $\{\sigma\}$ - вектор напряжений, S - плотность энтропии, $\{\alpha\}$ - вектор коэффициентов температурного расширения, T - текущая температура, Q - плотность потока тепла, T_0 -



абсолютная температура окружающей среды, $\{\beta\}$ - вектор термоупругих коэффициентов, ρ - плотность, C_V - удельная теплоемкость при постоянной деформации, C_p - удельная теплоемкость при постоянной нагрузке, $[K]$ - матрица теплопроводности.

Рис. 1. Схема взаимодействия колодки и колеса (1 - фрагмент колеса, 2 - подошва тормозного башмака, 3 - тормозной башмак, 4 - втулка)

В процессе нагружения системы силой P возникает несколько контактных поверхностей, а именно: колодки с колесом, башмака с колодкой, втулки с башмаком и нагружаемого цилиндра со

втулкой. В области контакта задано Кулоновское трение $F_{fr} = kN$, где k - коэффициент трения, а $N = F(P)$ - есть некоторая функция нормальной реакции, зависящая от прижимной силы P .

Вне области контакта задан свободный теплообмен с окружающей средой и отсутствуют нагрузки. Также на систему наложены кинематические условия, состоящие в блокировке некоторых направлений перемещения тормозного башмака и во вращении самого колеса, которое было задано по линейному закону, что моделирует ситуацию движения поезда под уклон, когда необходимо сохранять постоянную скорость движения состава. В таких случаях в зависимости от длины пути и скорости время движения может достигать довольно больших величин и процесс теплообразования при торможении может значительно влиять на поведение тормозной системы железнодорожного состава.

Метод конечных элементов. Задача решалась с помощью конечно-элементного пакета ANSYS 11 [3-5]. Для построения модели тел был использован восьмиузловой элемент PLANE223, допускающий при моделировании учет как упругих, так и температурных полей, конечно-элементные матричные уравнения которого имеют вид:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{ut}] \\ & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

где M - матрица масс, C - матрица демпфирования, K - матрица жесткости, u - вектор смещений, F - сумма узловых усилий и давлений на элементах, C^t - удельная теплоемкость, K^t - матрица диффузионной проводимости, T - вектор температур, K^{ut} - матрица термоупругой жесткости, B - матрица напряжений-смещений, N - функции формы элементов, C^{ut} - матрица термоупругого демпфирования.

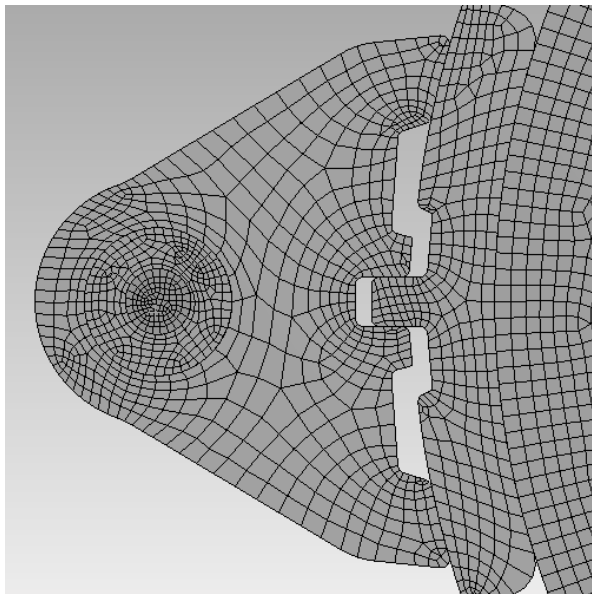
Контактные поверхности задавались с помощью элементов CONTA172 и TARGET169. Особое внимание необходимо обратить на задание ключевых опций элемента CONTA172. В случае поставленной задачи необходимо к числу степеней свободы контактного элемента добавить учет температуры, а также исключить начальные

проникновения или разрывы. Для моделирования процесса передачи тепла между контактирующими поверхностями требуется задать контакт с трением, а также величину коэффициента контактной теплопроводности, который связан с пропорциональностью потока тепла между поверхностями разности температур контактирующих тел. Сетка строилась канонической и сгущалась в зонах, близких к контактными областям, для достижения оптимальной точности и времени расчета. К центру колеса в некотором отдалении от контактирующей поверхности сетка делалась крупнее, так как термоупругие поля в этой зоне не представляют большого интереса, а время расчета задачи значительно зависит от количества элементов. Для оптимизации разбиения сетки были использованы различные встроенные методы. Размеры элементов на противоположных поверхностях в контактной паре были выбраны одинаковыми для корректного решения задачи.

Для моделирования процесса трения был выбран FULL TRANSIENT анализ с таким разбиением по времени, чтобы за один шаг колеса поворачивалось, примерно, на один градус. Данное разбиение обеспечивает достаточную точность решения для полученной сетки. При использовании большего шага по времени моделирование показывало неправдоподобные результаты: скачки тел относительно друг друга, скачкообразное изменение тепловых полей. При решении задачи с другим разбиением областей необходимо отдельно выявить оптимальный шаг по времени. Учитывая нелинейность задачи, для решения был использован несимметричный решатель.

Проведение расчетов температурных полей и напряженно-деформированного состояния проводилось при различных режимах вращения колеса (различные режимы торможения и скорости вращения колеса), различной величине прижимающей силы и различных физико-механических параметрах деталей рассматриваемой механической системы. В процессе реального движения состава количество поворотов колеса может достигать сотен и тысяч, что в результате требует решения огромного количества контактных термоупругих задач. Процесс расчета на современном двухядерном персональном компьютере довольно затратный по времени. Например, для того чтобы провести расчет при 40 оборотах колеса с сохранением всех данных о температурных полях и напряженно-деформированном состоянии в каждый момент

требуется не менее 38 часов компьютерного времени.



На рис. 2 показан пример конечно-элементного разбиения областей всех элементов системы взаимодействующих тел.

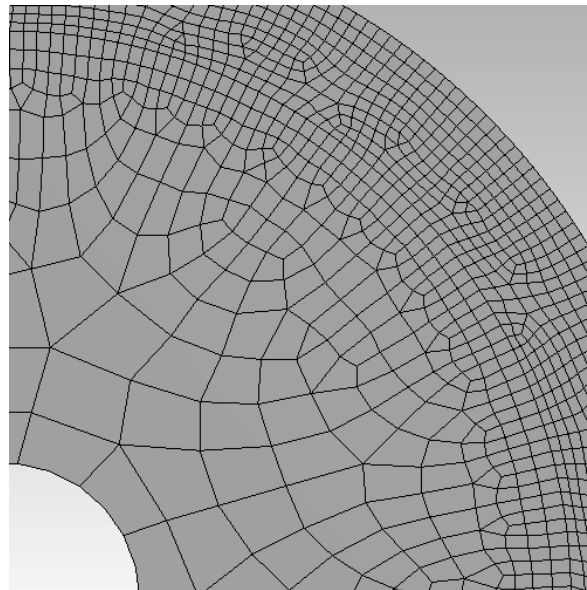


Рис. 2. Пример конечно-элементного разбиения областей

Числовые расчеты. Для проведения расчетов в случае большого числа оборотов колеса использовались суперкомпьютерная система, состоящая из четырёх вычислительных кластеров Edge-8 «Т-Платформы» с производительностью по 300 гигафлопс каждый, и лицензионное программное обеспечение ANSYS 11.0 с возможностями проведения параллельных вычислений. Отметим, что имеющееся оборудование и программное обеспечение позволяли рассчитывать конечно-элементные модели с большим количеством узлов и с большим числом оборотов колеса, добиваясь необходимой точности вычислений.

На рис. 3 в качестве примера показаны характерные температурные поля в различные моменты времени. В качестве физико-механических параметров колеса и башмака брались параметры стали, колодки – чугуна, а втулки – меди. Радиус колеса предполагался равным 0.475 м, усилие, действующее на колодку, $P=35000$ н/м. Стальные детали имели следующие параметры: плотность – $\rho_c=7859$ кг/м³, модуль Юнга - $E_c=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона - $\nu_c=0.3$, теплоемкость – 434 дж/(град кг), теплопроводность – 60.5 вт/(град м), коэффициент температурного расширения - $1.2 \cdot 10^{-5}$ 1/град. Медная втулка имела следующие параметры: плотность – $\rho_c=8300$ кг/м³, модуль Юнга –

$E_c=1.1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона - $\nu_c=0.34$, теплоемкость – 385 дж/(град кг), теплопроводность – 401 вт/(град м), коэффициент температурного расширения - $1.8 \cdot 10^{-5}$ 1/град. Чугунная тормозная колодка имела следующие параметры: плотность – $\rho_c=7200$ кг/м³, модуль Юнга - $E_c=1.1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона – $\nu_c=0.28$, теплоемкость – 447 дж/(град кг), теплопроводность – 52 вт/(град.м), коэффициент температурного расширения - $1.1 \cdot 10^{-5}$ 1/град. В рассмотренном примере угловая скорость вращения колеса постоянна и равна 1/12 сек-1, коэффициент трения – $k=0.3$.

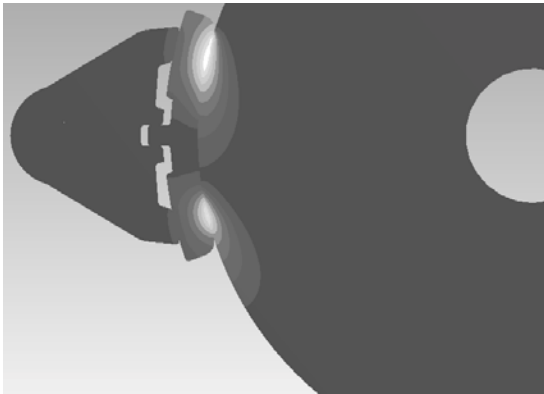
В начальный момент времени предполагалось, что температура окружающей среды и системы «тормозная колодка – колесо» одинакова и равнялась 10 град. С. В рассмотренном варианте за половину оборота колеса температура в зоне контакта повысилась на 0.24 град.

Выводы. Анализ проведенных температурных расчетов для рассмотренной модельной задачи показал, что в начальный момент времени максимальные температуры возникают на краях тормозной колодки, а со временем они перемещаются ближе к центральной части колодки в окрестность ее контактной поверхности с колесом. Показано

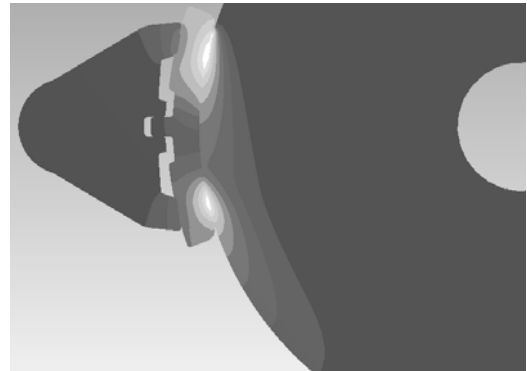
также, что при определенных режимах теплообмена с окружающей средой относительный максимум температуры в некоторых областях колеса вне области контакта находится не на поверхности катания колеса, а на некотором расстоянии от нее, что было ранее отмечено в [1].

Изложенная схема исследования взаимодействия однородной тормозной колодки и

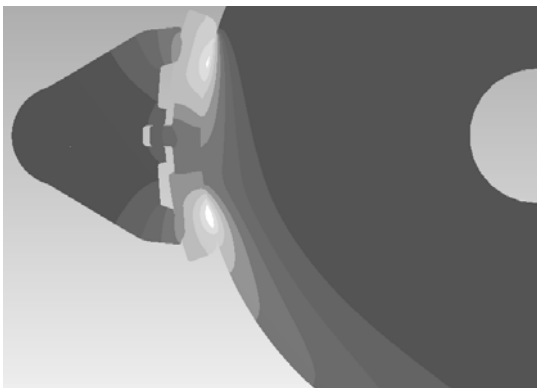
колеса при равномерном вращении колеса может быть распространена также на случай композиционной колодки соответствующей заменой конечных элементов колодки, а также на случай неравномерного вращения колеса. Аналогично может быть рассмотрен случай воздействия на бандажированное колесо двух тормозных колодок.



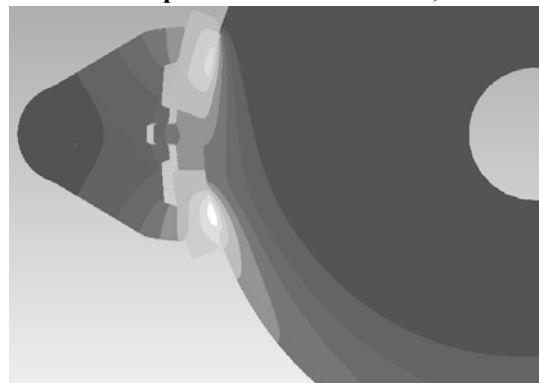
а - поворот колеса на 15° за 0,5 с.



б - поворот колеса на 45° за 1,5 с.



в - поворот колеса на 90° за 3 с.



г - поворот колеса на 180° за 6 с.

Рис. 3. Распределение температуры в разные моменты времени

Результаты дальнейших планируемых исследований взаимодействия тормозных колодок и железнодорожного колеса вагона или электровоза с учетом их геометрии в трехмерном варианте могут быть использованы при проектировании новых типов тормозных колодок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-08-90022 Бел_а, 11-08-00909).

Литература

1. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах/ В.И. Колесников. М.: Наука., 2003. 280 с.
2. Новацкий, В. Теория упругости/ В. Новацкий. М.: Мир, 1975. 872 с.
3. Kohnke, P. Theory references for the Mechanical APDL and Mechanical Applications/ P. Kohnke. 2009. 1183 p.
4. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задача /К.А. Басов. М.: Компьютер пресс, 2002. 224 с.
5. Морозов, А. Ю., ANSYS в руках инженера: механика разрушения / А.Ю. Морозов, А.С. Музеймек, Е.М. Шадский. М.: ЛЕНАНД, 2008. 456 с.

References

1. Kolesnikov, V.I. Thermo-physical processes in metal- polymer tribosystems / V.I. Kolesnikov. – Moscow : Nauka, 2003. – 280 p.
2. Nowackiy, W. Theory of Elasticity / W. Nowackiy. – Moscow : Mir, 1975. – 872 p.
3. Kohnke, P. Theory references for the Mechanical APDL and Mechanical Applications / P. Kohnke. – 2009. – 1183 p.
4. Basov, KA. ANSYS in examples and problems / K. Basov. – Moscow : Computer Press, 2002. – 224 p.
5. Morozov, A.Yu. ANSYS in the hands of the engineer: fracture mechanics / A.Yu. Morozov, A.S. Muyzemnek, E.M. Shadskiy. – Moscow : LENAND, 2008. – 456 p

Чебаков М. І., Ляпін О. О., Колесніков І. В.
Взаємодія гальмівної колодки і залізничного колеса з урахуванням тепловиділення від тертя

Побудовано кінцево-елементну модель взаємодії гальмівної колодки і залізничного колеса з урахуванням тертя, тепловиділення від тертя і обертання колеса. Проведено розрахунки напружено-деформованого стану і температурних полів в моделюючій системі при різних режимах обертання колеса і різних фізико-механічних параметрах завдання.

Ключові слова: гальмівна колодка, тертя, тепловиділення від тертя, термопружність, математичне моделювання, контактна взаємодія.

Chebakov M. I., Lyapin A. A., Kolesnikov I.
V. Interaction between the brake pads and railway wheel in the presence of heat from friction

The finite element model of the interaction brake pads and railway wheel with friction, heat from the friction and rotation of a wheel is created. Calculations of the stress-strain state and temperature fields in the simulated system in different modes of rotation of a wheel and various

physical and mechanical parameters of the problem are made.

Keywords: brake pads, friction, heat from friction, thermoelasticity, mathematical modeling, contact interaction.

Чебаков М. И. – д.ф.-м.н., проф., зав. отделом механики контактных взаимодействий, Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики ЮФУ, e-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Ляпин А. А. – аспирант отдела механики контактных взаимодействий, Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики ЮФУ, e-mail: Jeroma61@yandex.ru

Колесников И. В. – к.т.н., доц. кафедры «Теоретическая механика», Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), e-mail: kolesnikoviv@rgups.ru

Статья подана 4.06.2013 УДК 656.613