

УДК 539.621:004.94

О. А. СУХАНОВА, А. О. ШИМАНОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

РЕШЕНИЕ В ANSYS WORKBENCH ЗАДАЧИ О НАГРЕВЕ ТЕЛ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Решается динамическая связанная задача об анализе тепловых процессов в упругодеформируемых телах, которые находятся в контактном взаимодействии : полуцилиндре, скользящем по шероховатой поверхности неподвижного параллелепипеда. Разработан алгоритм решения термпрочностной задачи в среде пакета ANSYS Workbench. Рассмотрены детали создания конечно-элементной модели. Приведены результаты расчетов эквивалентных по Мизесу напряжений и температуры в контактирующих телах.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, контактное взаимодействие, термпрочностная задача.

При эксплуатации подвижных сочленений механизмов их работоспособность во многом определяется особенностями трения и износа контактирующих деталей. Поверхности, находящиеся во фрикционном взаимодействии, испытывают нагрев, а тепловые деформации на дискретных пятнах фактического контакта влияют на нагрузочную способность деталей, долговечность и надежность конструкции в целом [1, 2]. Генерируемые в результате трения одного тела о поверхность другого тепловые потоки распространяются вглубь сопрягаемых деталей, распределяясь в зависимости от теплофизических, механических свойств взаимодействующих объектов, геометрии области их контакта [3–5]. Экспериментальная оценка нестационарных температурных полей затруднена вследствие непрерывности перемещения, случайности размеров микроскопических пятен нагрева и охлаждения на поверхностях сопрягаемых тел. В свою очередь расчетные методы дают возможность оценки температуры в областях расположения пятен контакта и за их пределами.

В настоящее время значительное развитие получили методы мультифизического компьютерного моделирования технических объектов, позволяющих комплексно рассмотреть при численных расчетах различные физические процессы и взаимосвязи между ними. В частности, имеются публикации, в которых анализируется изменение температуры, связанное с тепловыделением в месте контакта трущихся деталей [6, 7]. В большинстве таких работ анализируются процессы, наблюдаемые при работе дисковых тормозов [8–11]. Также существуют исследования сварки трением [12] и работы амортизирующих устройств [13]. Однако в них, как правило, весьма сокращенно описываются детали построения компьютерной модели, связанные с необходимостью совместного решения задач механики и теплового анализа, что не всегда позволяет подтвердить адекватность получаемых результатов.

Представленная статья является дальнейшим развитием опубликованных ранее работ [14–16]. В ней приводится детальное описание решения задачи об анализе тепловых процессов, связанных со скольжением одного тела по поверхности другого при наличии сухого трения, в среде программного пакета инженерного анализа методом конечных элементов ANSYS Workbench, а также приводятся некоторые результаты расчетов.

Первой стадией работы стало построение геометрической модели, включающей платформу в форме параллелепипеда размерами 200×20×10 мм, с которой находится в контакте полуцилиндр радиусом 10, длиной 20 мм.

Сразу же были задан материал элементов модели и его свойства, для чего использована ячейка инженерных данных Engineering Data проекта Project Schematic. Из стандартной библиотеки Workbench была выбрана конструкционная сталь (structural steel) с модулем упругости 200 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3. Для анализа связанных полей потребовалось задать не только прочностные характеристики, но и свойства стали для теплового расчета: теплопроводность (Isotropic thermal conductivity) 60,5 Вт/м·К, удельная теплоемкость для нестационарного теплового расчета (Specific heat constant pressure) 434 Дж/кг·К. При необходимости проверка правильности ввода характеристик материала осуществляется путем отключения фильтра Filter Engineering Data.

Далее в ветке дерева проекта Model – Geometry был назначен двадцатиузловой гексаэдрический (или brick) элемент Solid 226, используемый для связанных расчетов в объемной постановке. Такой тип конечного элемента задан для обоих тел вводом команды

et.matid.226.11.

Здесь число 11 свидетельствует о наличии степени свободы не только по перемещениям, но и по температуре.

Конечно-элементная сетка (рисунок 1) была сгенерирована в ветке Mesh. Общее количество элементов моделей полуцилиндра и параллелепипеда составило 5500 и 27436 соответственно.

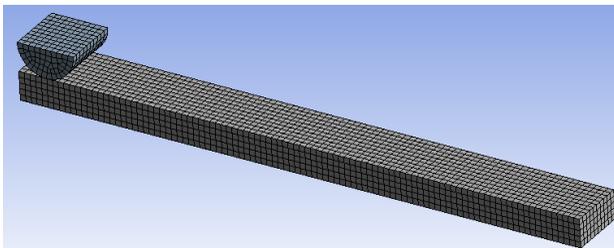


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель

Несимметричный (Asymmetric) контакт с трением (Frictional contacts) создан в ветке Connections. Он предполагает, что все контактные элементы определены на одной поверхности, а целевые, в отличие от симметричного контакта, на

другой. Значение коэффициента трения принималось равным 0,3. Для обеспечения сходимости решения были приняты следующие настройки контактной пары: Formulation – Augmented Lagrange; Update Stiffness – Each Iteration; Normal Stiffness Factor – 0,1; Auto Detection – Generate Automatic Connection on refresh – No.

Для того чтобы учесть тепловыделение при трении, в ANSYS используется формула

$$q = FHGT \cdot \tau \cdot v ,$$

где q – плотность теплового потока при трении, Вт/м²; $FHGT$ – коэффициент рассеяния энергии; τ – эквивалентное напряжение трения, Дж/м³; v – скорость скольжения, м/с.

Распределение тепла между контактной (c) и целевой (t) поверхностью описывается зависимостями

$$q_c = FWGT \cdot q ; \quad q_t = (1 - FWGT) \cdot q ,$$

где $FWGT$ – весовой коэффициент распределения тепла, изменяющийся в пределах от 0 до 1.

Параметры для плотности теплового потока были определены в ветке программы Contacts – Frictional комбинацией команд:

```
keyopt,cid,1,1  
rmodif,cid,15,1  
rmodif,cid,18,0.5
```

Здесь опция «1» в первой строке позволяет использовать температуру в качестве степени свободы для структурного анализа. Число «15» позволяет назначить $FHGT = 1$; а «18» – $FWGT = 0,5$ (т. е. тепло, образующееся при трении, равномерно распределяется между контактной и целевой поверхностями).

В окне Toolbox Analysis Systems, был выбран расчетный модуль – нестационарный прочностной анализ Transient structural. В ветке Transient заданы следующие настройки: Number of steps – 1; Auto time stepping – on; Initial time step – 0,01; Stabilization – constant; Energy dissipation ratio – 0,1

В тестовом примере принято, что на верхнюю поверхность полуцилиндра, перемещающегося по жестко закрепленной платформе со скоростью 0,01 м/с, действует давление 10 МПа. Тепловые граничные условия задавались командами:

```
tref,22  
cmsel,s,temp  
d,all,temp,22  
allsel,all
```

Здесь в первой строке задана температура, при которой тела не испытывают тепловую деформацию – 22 °С. Во второй строке выбраны узлы на поверхностях, ранее помеченные как «temp». Третья строка назначает узлам

начальное значение температуры, четвертая – выбирает все узлы на поверхностях для последующего расчета.

В ходе расчетов были получены распределения напряжений, деформаций и температур для разных моментов времени. На рисунке 2 приведена картина распределения эквивалентных по Мизесу напряжений для момента времени $t = 10$ с, из которой видно, что максимальные напряжения наблюдаются вдоль продольных ребер полуцилиндра. Аналогичное распределение напряжений наблюдается и в иные моменты времени. Характер распределения температуры на контактных поверхностях для момента $t = 0,1$ с приведен на рисунке 3. Наибольшие температуры имеют место на поверхности полуцилиндра.

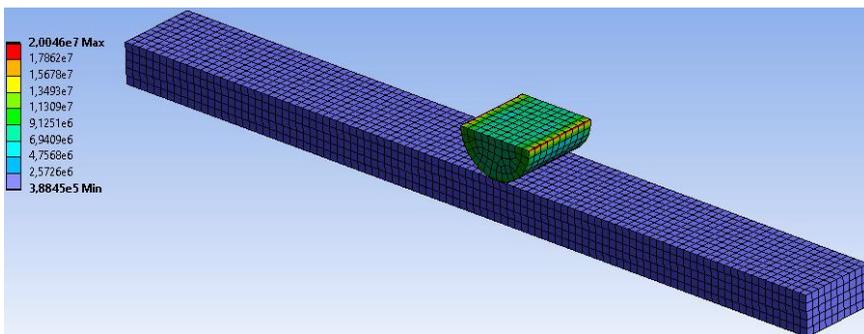


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в момент $t = 10$ с

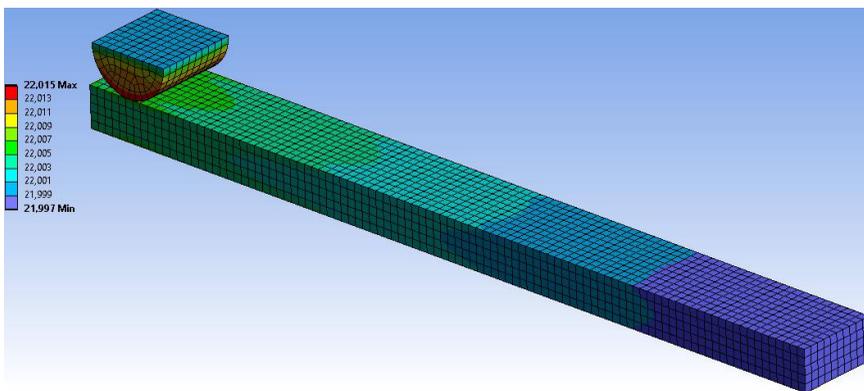


Рисунок 3 – Распределение температуры на поверхностях тел в момент $t = 0,1$ с.

Построены зависимости температуры от времени для нескольких точек, находящихся вблизи поверхности параллелепипеда (рисунок 4). Они демонстрируют, что наибольшая температура наблюдается на первых секундах движения, когда место контакта располагается вблизи конкретной точки. Затем вследствие теплопроводности материала наблюдается постепенное снижение

температуры. Незначительность ее изменения (лишь на тысячные доли градуса) связана с малой скоростью движения полуцилиндра.

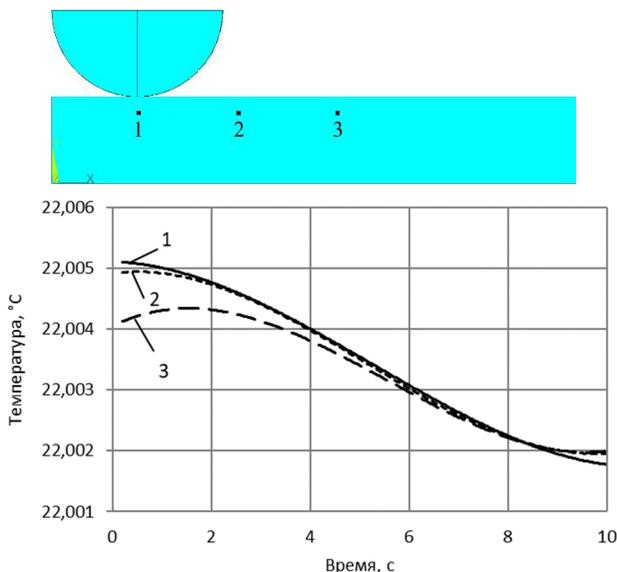


Рисунок 4 – Изменение температуры в зависимости от времени для точек 1, 2 и 3

Представленная методика решения термпрочностной задачи позволяет исследовать более сложные динамические системы, в которых существенную роль играет нагрев тел, обусловленный трением скольжения. В таких случаях потребуются значительные вычислительные ресурсы, однако алгоритм действий будет включать описанные в работе этапы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Полюшкин, Н. Г.** Основы теории трения, износа и смазки : учеб. пособие / Н. Г. Полюшкин. – Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. – 192 с.

2 **Яицков, И. А.** Отвод тепловой энергии путем теплопроводности элементов конструкции дисковых тормозных механизмов / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Современные проблемы теории машин. – 2021. – № 12. – С. 16–20.

3 **Маломыжев, Д. О.** Анализ достоверности решения методом конечных элементов задачи расчета деталей на усталостную прочность при повторно-переменных напряжениях / Д. О. Маломыжев, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 10–20.

4 **Li, D. H.** Dynamic thermomechanical analysis on stiffened composite plates with damage / D. H. Li, S. Ma // Journal of Thermal Stresses. – 2023. – Vol. 46, is. 12. – P. 1267–1295.

5 **Faidh-Allah, M. H.** Numerical and finite element contact temperature analysis of friction materials type effect on a thermal transient behavior of a single-disc dry clutch / M. H. Faidh-Allah // Tribologia. – 2017. – Vol. 271, is. 1. – P. 35–43.

6 Numerical analysis of temperature distribution in sliding contacts of pin on disc model / A. K. Singh [et al.] // *Vibroengineering Procedia*. – 2019. – Vol. 29. – P. 274–278.

7 **Wu, G.** Thermal-mechanical coupling analysis of disc brake based on ANSYS Workbench / G. Wu, D. Zhang // *Lubrication Engineering*. – 2022. – Vol. 47, is. 10. – P. 126–133 (in Chinese).

8 Thermal stress simulation and fatigue life of commercial vehicle disk brakes under emergency braking conditions / X. Yin [et al.] // *AIP Advances*. – 2023. – Vol. 13, is. 12. – Article 125220. – 10 p.

9 **Mouffak, E.** Transient thermal behavior of automotive dry clutch discs by using ANSYS software / E. Mouffak, M. Bouchetara // *Mechanics*. – 2016. – Vol. 22, is. 6. – P. 562–570.

10 **Belhocine, A.** Finite element analysis (FEA) of frictional contact phenomenon on vehicle braking system / A. Belhocine, O. I. Abdullah // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2022. – Vol. 50, is. 9. – P. 2961–2996.

11 Моделирование термодинамических процессов в дисковых тормозах карьерной спецтехники с использованием метода конечных элементов (часть 1) / А. А. Волосатов [и др.] // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2024. – № 3 (163). – С. 65–77.

12 Влияние формы заготовок на остаточные напряжения при линейной сварке трением / А. Н. Паутов [и др.] // *Frontier Materials & Technologies*. – 2022. – № 4. – С. 102–112.

13 **Бояршинов, Д. А.** Модель термомеханического поведения амортизационного узла / Д. А. Бояршинов, О. Ю. Сметанников // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 303–315.

14 **Суханова, О. А.** Анализ пластических деформаций при скольжении сферической колодки по поверхности диска / О. А. Суханова // *Механика. Исследования и инновации*. – 2018. – Вып. 11. – С. 230–234.

15 **Шимановский, А. О.** Изменение напряженно-деформированного состояния элементов дискового тормоза при торможении / А. О. Шимановский, О. А. Суханова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2020. – Т. 66, № 4. – С. 8–18.

16 **Суханова, О. А.** Моделирование тепловых процессов, связанных со скольжением твердого тела по неподвижной поверхности / О. А. Суханова // *Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. , Гомель, 21–22 ноября 2024 г. : в 2 ч. Ч. 2*. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 206–208.

O. A. SUKHANOVA, A. O. SHIMANOVSKY

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

SOLUTION OF A PROBLEM OF BODIES HEATING AT SLIDING FRICTION IN ANSYS WORKBENCH

A dynamic coupled problem of analyzing thermal processes in elastically deformable bodies that are in contact interaction is solved: a semi-cylinder sliding along the rough surface of a stationary parallelepiped. An algorithm for solving a thermal strength problem in the ANSYS Workbench package environment is developed. Details of creating a finite element model are considered. The results of calculating the von Mises equivalent stresses and temperature in contacting bodies are presented.

Keywords: finite element modeling, contact interaction, thermal strength problem.

Получено 10.10.2024