

Цитирование: Учет контактных взаимодействий при моделировании жесткостных свойств роликовых подшипников / С. А. Дегтярев, М. Н. Кутаков, М. К. Леонтьев [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 137-141.

УДК 621.452.3.034

УЧЕТ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖЕСТКОСТНЫХ СВОЙСТВ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ

Дегтярев С.А., Кутаков М.Н., Леонтьев М.К., Попов В.В., Ромашин Ю.С.

Аннотация

При решении задач роторной динамики авиационных газотурбинных двигателей, имеет большое значение точность расчета жесткостных характеристик опор ротора. Одним из самых распространенных элементов опор является роликовый подшипник, моделирование которого связано с необходимостью учета контактных взаимодействий между телами качения и кольцами. Обычно это взаимодействие описывают с помощью аналитических или эмпирических формул. В данной работе приводится вывод зависимости между внешней нагрузкой и перемещением для задачи линейного контакта половины цилиндра и плоской поверхности с помощью метода конечных элементов. Полученная зависимость сравнивается с эмпирически полученной формулой Палмгрена для той же задачи.

Ключевые слова: роликовый подшипник, жесткость, контактное взаимодействие

Введение

При решении задач роторной динамики авиационных газотурбинных двигателей, имеет большое значение точность расчета жесткостных характеристик опор ротора. В общей жесткости опорного узла ротора ГТД участвуют подшипники – шариковые или роликовые, жесткость которых зависит от многих факторов – геометрии, числа тел качения, величины зазоров, радиальных и осевых нагрузок, свойств материалов, температурного нагружения и других.

Специфика моделирования жесткостных свойств роликовых подшипников в первую очередь связана с контактными явлениями между телами качения и кольцами. Взаимодействие тел рассматривается как внутренний контакт двух цилиндров вдоль образующей. Аналитическое решение этой задачи, полученное на основе контактной теории Герца, было опубликовано в работе Лундберга-Шевалла [1], однако полученная зависимость между перемещением и внешней силой неудобна для использования в практических расчетах, так как невозможно представить обратную зависимость (т.е. силы от перемещения) в явном виде. В работе Харриса [2], одной из основополагающей по анализу роликовых подшипников, эта же зависимость описывается с помощью эмпирически полученной формулы Палмгрена. Более обоснованно данную зависимость можно получить путем применения численных методик, основанных на методе конечных элементов (МКЭ). В настоящей работе представлено получение зависимости между внешней силой и перемещением в задаче контакта половины цилиндра и плоской поверхности с помощью МКЭ.

Общая теория

Согласно аналитическому решению контактной задачи о взаимодействии двух цилиндров, опубликованному в работе Лундберга-Шевалла [1], перемещение в точке контакта равно

$$\delta = \frac{2Q(1-\nu^2)}{\pi El} \ln \left[\frac{\pi El^2}{Q(1-\nu^2)(1 \pm \gamma)} \right] \quad (1)$$

где Q – внешняя действующая нагрузка, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, l – длина цилиндров, γ – отношение диаметров цилиндров (знак зависит от взаимного расположения цилиндров друг относительно друга).

На практике используются эмпирические зависимости. Одной из распространенной является формула Палмгрена

$$\delta = 3.84 \cdot 10^{-5} \frac{Q^{0.9}}{l^{0.8}} \quad (2)$$

Выразив Q через δ , получаем формулу, используемую в работе Харриса [2]

$$Q = 8.06 \cdot 10^4 l^{\frac{8}{9}} \delta^{\frac{10}{9}} \quad (3)$$

Запишем (3) в виде, подобном закону Гука

$$Q = \left(8.06 \cdot 10^4 l^{\frac{8}{9}} \delta^{\frac{1}{9}} \right) \delta = K \delta. \quad (4)$$

где $K = 8.06 \cdot 10^4 l^{\frac{8}{9}} \delta^{\frac{1}{9}}$ – коэффициент контактной жесткости.

Постановка задачи и описание конечно-элементной модели

Для получения зависимости между внешней нагрузкой и перемещением решалась задача о контакте половины цилиндра с плоской деформируемой поверхностью (цилиндр с бесконечным радиусом) при различных длинах контактной линии (Рис.1). Длина варьировалась от 0.5 до 50 мм.

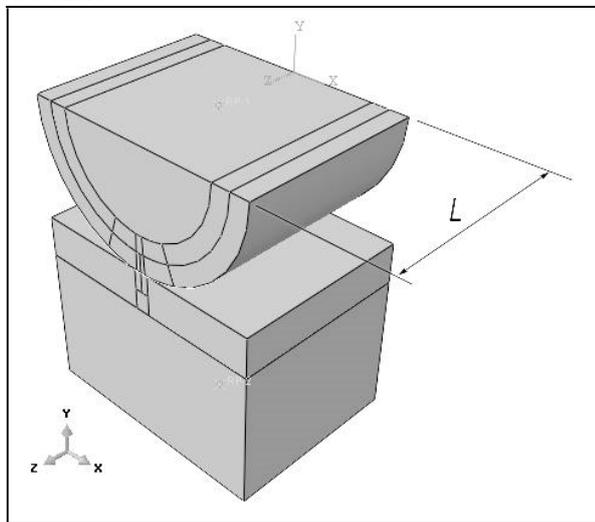


Рис. 1 Постановка задачи о контакте цилиндра и плоскости. L – длина контактной линии (варьируемая величина)

Для моделирования использовались гексаэдральные линейные 8-ми узловые конечные элементы. Конечно-элементная сетка показана на Рис. 2. В месте контакта имеется сгущение сетки. Количество узлов в модели - 62096. Места нагружения и закрепления показаны на Рис. 3. Модель закрепляется по поверхности по всем степеням свободы. Нагрузка прикладывается по поверхности в направлении противоположном оси

Y , величина нагрузки 2000 Н. Материал – изотропный, модуль Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0.3. Контактная задача решалась методом Лагранжа.

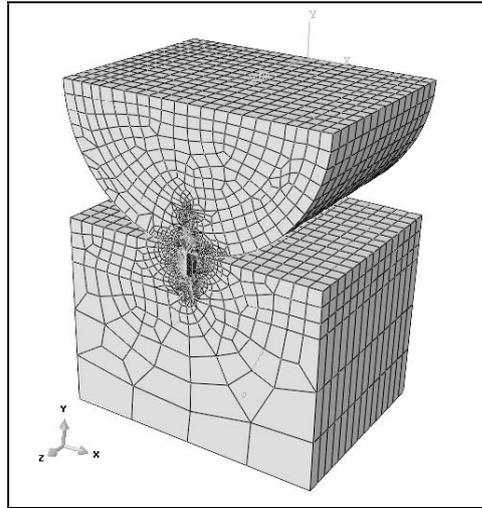


Рис. 2 Конечно-элементная сетка модели

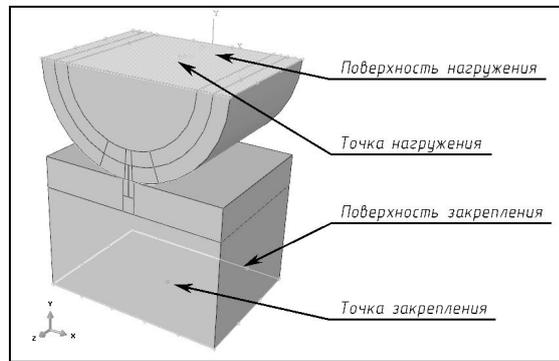


Рис. 3 Места нагружения и закрепления

Результаты расчета

Полученные в результате расчета данные представлены в виде зависимости вертикального перемещения от длины контактной линии (Рис. 4). Для наглядности на графики нанесены решения по формулам Палмгрена и Лундберга-Шевалла.

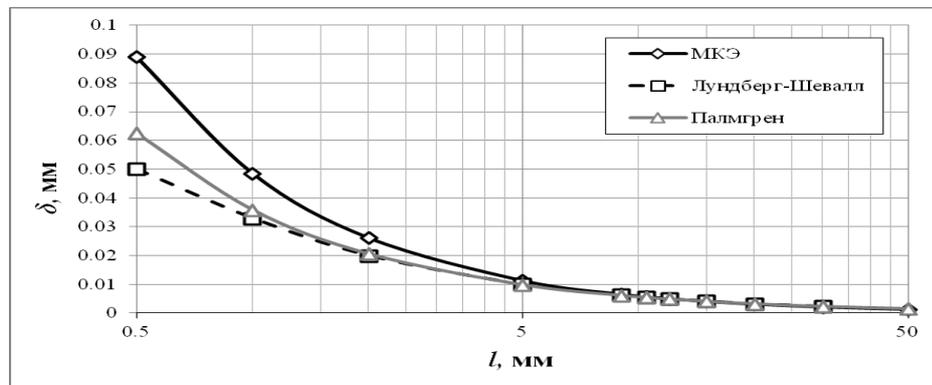


Рис. 4 Зависимость вертикального перемещения от длины цилиндра по различным методам расчета: сплошная кривая с квадратами – расчет с помощью МКЭ, точечная кривая с треугольниками – по формуле Палмгерена, пунктирная кривая с кружками – по формуле Лундберга-Шевалла

Однако, построив график относительной разницы между решениями с помощью МКЭ и по формуле Палмгрена (Рис. 5.), заметим, что формула Палмгрена верна с погрешностью в 5% для длин контактных линий от 10 до 20 мм.

После аппроксимации полученных при решении с помощью МКЭ результатов, была выведена зависимость

$$Q = 57865l^{1,011}\delta^{\frac{10}{9}}$$

или

$$Q = \left(57865l^{1,011}\delta^{\frac{1}{9}} \right) \delta = K\delta \quad (5)$$

Формула (5) дает не более 4% расхождения с расчетом с помощью МКЭ (Рис.5).

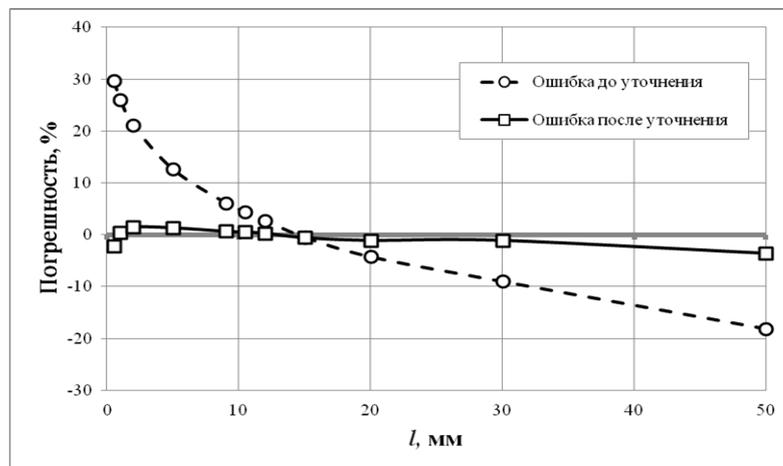


Рис. 5 Относительная разница решения по формуле Палмгрена (пунктирная кривая с кружками) и по формуле (5) (сплошная кривая с квадратами) относительно решения в МКЭ

На Рис. 6 показаны значения контактных жесткостей, полученных по формуле Палмгрена и формуле (5).

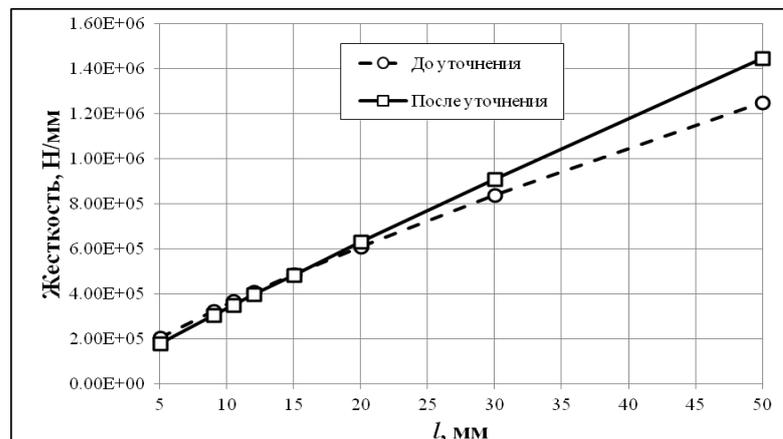


Рис. 6 Значения контактных жесткостей

Закключение

В статье были показаны решения задачи о контактном взаимодействии половины цилиндра и плоскости при различных длинах контактной линии (от 0.5 до 50 мм) с помощью МКЭ. Полученные результаты сравнивались с эмпирически полученной формулой Палмгрена. Было показано, что формула Палмгрена дает результаты, отличающиеся от решения с помощью МКЭ до 30% в зоне длин контакта от 0,5 до 50 мм. Путем аппроксимации полученных результатов была выведена новая формула, дающая результаты с погрешностью не более 3% на всем промежутке от 0.5 до 50 мм исследуемых длин контактных линий. Полученные результаты могут быть использованы в конструкторских бюро, ведущих проектирование авиационных газотурбинных двигателей, и, в частности, при решении задач роторной динамики.

Литература

1. Lundberg, G. and Sjövall, H. *Stress and Deformation in Elastic Contacts*, Pub. 4, Institute of Theory of Elasticity and Strength of Materials, Chalmers Inst. Tech., Gothenburg, 1958. 47p.
2. Harris T.A. *Rolling bearing analysis*. New York, John Wiley and Sons, 1984, ch. 6-7, pp. 101-159 (565 p.).