ОПИСАНИЕ СИЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МЕЖДУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ

Лутьянов Александр Владимирович
кандидат техн. наук, доцент
Российский технологический университет МИРЭА
г. Москва

DESCRIPTION OF INTERNAL FRICTION FORCES BETWEEN CYLINDRICAL SURFACES WHEN STABILITY TASKS

Lutyanov Alexander Vladimirovich
Candidate of tech. Sciences, assistant professor
Russian Technological University MIREA
Moscow

Аннотация

Статья посвящена постановке задачи описания сил давления в смазочном зазоре между цилиндрическими оболочками. Рассмотрен вопрос распределения силы по периметру поверхности и описанию неразрывности процесса подачи сжатого воздуха в смазочный зазор. Спрогнозированы критерии устойчивости и граничные условия для расчета надежности технологической системы.

Abstract

The article is devoted to the formulation of the problem of describing the pressure forces in the lubricating gap between cylindrical shells. The question of the distribution of force along the perimeter of the surface and the description of the continuity of the process of supplying compressed air to the lubricating gap is considered. The stability criteria and boundary conditions for calculating the reliability of the technological system are predicted.

Ключевые слова: внутреннее трение, цилиндрические подшипники, неразрывность потока, сжатый воздух.

Key words: internal friction, cylindrical bearings, non-discontinuity of flow, compressed air.

При прохождении сжатого воздуха в зазорах аэростатических подшипников необходимо рассмотреть вопрос равномерности распределения давления по периметру поверхности и оценить степень устойчивости технологической системы.

Сила давления, развивающаяся в тонком слое вязкого газа, при давлении в сплошной среде $P = P(q_1, q_2, q_3)$, градиент давления в криволинейной ортогональной системе (q_1, q_2, q_3) с метрической координатой q_3, определяется выражением

$$gradP = \frac{e_1}{L_1}\frac{\partial P}{\partial q_1} + \frac{e_2}{L_2}\frac{\partial P}{\partial q_2} + \frac{e_3}{L_3}\frac{\partial P}{\partial q_3} \quad (1)$$

Вектор направлен в сторону возрастания давления и равен производной функции P в этом направлении. Если в любом месте сплошной среды выделить элементарную площадку размером ds_0, ориентированную перпендикулярно вектору (1), а потом поступательно переместить ее в направлении градиента на сколь угодно малый отрезок dl, то получим призматический элемент сплошной среды объемом

$$d\sigma = dl \cdot ds_0 \quad (2)$$

Давление, действующее на верхнее (в направлении градиента P), будет больше чем на нижнее на величину $dl \cdot |gradP|$. Поэтому результирующая сил давления, приложенных к поверхности призматического тела объемом (2), будет равна

$$dF_p = -ds_0 \cdot dl \cdot gradP = -d\sigma \cdot gradP \quad (3).$$

Изменение скорости течения сжатого воздуха в пространстве смазочного слоя представлено на рисунке 1.

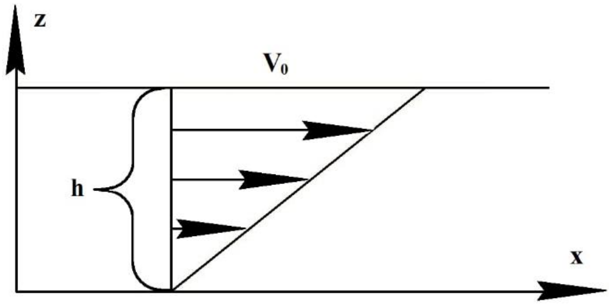

Рисунок 1. Изменение скорости течения воздуха в газовом зазоре

С учетом силы давления на боковую поверхность элементарного объема в направлении единичного вектора e, образующего углы, α, β, и γ с координатными осями $[q_1]$, $[q_2]$ и $[q_3]$ соответственно. Тогда

$$e = e_1 cos\alpha + e_2 cos\beta + e_3 cos\gamma.$$

Производная давления в направлении оси v равна проекции на эту ось градиента давления:

$$\frac{dP}{dv} = (e, gradP) = \frac{1}{L_1}\frac{\partial P}{\partial q_1} cos\alpha + \frac{1}{L_2}\frac{\partial P}{\partial q_2} cos\beta + \frac{1}{L_3}\frac{\partial P}{\partial q_3} cos\gamma.$$

Если $e \perp gradP$, то производная равна нулю. А это значит, что во всех точках боковой поверхности элементарного объема давление одинаково.

Уравнение Рейнольдса в цилиндрической системе координат для смазочного слоя, заключенного между цилиндрическими поверхностями (при необязательном совмещении осей цилиндров):

$$\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \varphi} = \mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2}, \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2}, \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

Дифференциальное уравнение, определяющее закон изменения давления в слое газовой смазки цилиндрического подшипника, когда R – радиус смазочного слоя, $2 \cdot L$ – длина подшипника, c – радиальный зазор в соосном положении. Вал вращается с угловой скоростью ω. Считаем ось неподвижной и смазочный слой изотермический. Для общности будем считать, что зазор h является функцией как угловой, так и осевой координат. Присоединив к осевой z и угловой φ координатам нормальную n, направленную по нормали к внешней стенке, получим ортогональную криволинейную систему z, φ, n с коэффициентами Ламе $L_z = 1$, $L_\varphi = R$, $L_n = 1$.

Уравнение Рейнольдса и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V_z}{\partial n^2}, \frac{1}{R}\frac{\partial p}{\partial \varphi} = \mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial n^2}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0.$$

$$R\frac{\partial}{\partial z}(pV_z) + \frac{\partial p}{\partial \varphi}(pV_\varphi) + R\frac{\partial}{\partial n}(pV_n) = 0.$$

Граничные условия для скоростей

$$V_z = 0, V_\varphi = 0, V_n = 0 \text{ при } n = 0.$$

$$V_z = 0, V_\varphi = \omega \cdot R, V_n = \omega \frac{\partial h}{\partial \varphi} \text{ при } n = h.$$

Приведенные описания математической теории смазки в аэростатических втулках позволит смоделировать процесс возникновения колебаний в приспособлениях и условия возникновения резонанса в смазочном зазоре.

Введенные двухмерные цилиндрические системы координат смогут упростить расчет опор с микроканавками и снять некоторые ограничения при математическом моделировании технологических процессов.

Литература:

Лутьянов А.В., Страмцова Е.С. Особенности растачивания прерывистых отверстий на отделочно-расточных станках. Сборник научных трудов: материалы международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»; Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Выпуск 23 (XXIII) / Под ред. д.ф.-м.н., проф. Булатова М.Ф. – М.: 2017. – С. 170-173.

Емельянов А.В., Емельянов И.А., Зенкина И.А., Шихватов А.М. Математическое моделирование и оптимизация газодинамических подшипников со спиральными канавками. – Калуга: Издательский дом «Эйдос», 2003. – 219 с., табл., 89 ил.

Емельянов А.В. Исследование цилиндрического подшипника с винтовыми канавками и разветвляющимися потоками газовой смазки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1999, № 1. С. 21-27.

Лутьянов А.В. Анализ подходов в оценке точности отверстий корпусных деталей при растачивании в приспособлениях. / А.В. Лутьянов // Технология машиностроения. № 8, 2017 г . – С. 43-46.