Опачких А.Н., Солоп С.А., Колобов И.А., Малоземов В.Н.

Упорный подшипник с упругой опорной поверхностью и адаптированным к условиям трения профилем

*Ростовский государственный университет путей сообщения
(Россия, Ростов-на-Дону)*

doi: 10.18411/sr-10-06-2019-17

idsp: sciencerussia-10-06-2019-17

Аннотация

Рассматривается расчет гидродинамических моделей упорных подшипников скольжения с адаптированным к условиям трения профилем, работающих на ферромагнитном смазочном материале. На основании уравнений течения смазочного материала в рабочем зазоре, неразрывности, Дарси и Ламе для «тонкого слоя» найдены основные рабочие характеристики подшипника с учетом деформации опорной поверхности цапфы.

Ключевые слова: гидродинамика, упругогидродинамический параметр, адаптированный профиль, ферромагнитный смазочный материал.

Большинство исследований касаются подшипников скольжения, работающих с использованием электропроводящих смазочных материалов, обладающих демпфирующими свойствами [1–10]. Однако анализ этих работ показал, что в них не учитываются адаптация профиля и деформация опорной поверхности подшипниковой втулки при трении.

Решить проблему можно повышением несущей способности подшипников путем уточнения их расчетных моделей. Это основано на формировании расчетных гидродинамических моделей упорных подшипников при линейной постановке задачи. Решение реализуется для «тонкого слоя» с учетом деформации опорной поверхности подшипника с адаптированным к условиям трения профилем.

Схематично ламинарное течение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре упорного подшипника скольжения с вкладышем, работающего в режиме гидродинамического смазывания в паре с пористым покрытием на поверхности направляющей в условиях действия электромагнитного поля, показано на рис. 1. Вкладыш неподвижен, а направляющая движется в сторону сужения зазора с постоянной скоростью u^* .

Рисунок 1 - Рабочая схема с опорным профилем адаптированного к условиям трения упорного подшипника скольжения при деформации рабочей поверхности.

Размерные величины пористого и упругого слоев связаны соответственно с безразмерными величинами. Ползун и направляющая с пористым покрытием имеют адаптированный, деформируемый и недеформируемый контуры ($C_1 - C_5$), которые в декартовой системе координат описываются следующими уравнениями:

недеформируемый адаптированный контур:

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a' \sin \omega' x' = H'(x'),$$

деформируемый адаптированный контур C_2 :

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha - a' \sin \omega' x' + a \varphi \left(\frac{x'}{L} \right) = H'(x');$$

недеформируемый контур, прилегающий к жесткой опорной поверхности ползуна:

$$y' = h_1 + x' \operatorname{tg} \alpha;$$

контур направляющей:

$$y' = 0;$$

контур направляющей с пористым покрытием:

$$y' = -\tilde{H}.$$

Здесь $\tilde{H}$ – толщина пористого слоя α – угол наклона вкладыша к оси ox' , L – длина подшипника скольжения; h_0 – толщина смазочной пленки в начальном сечении; $h_1 - h_0$ – толщина упругого слоя; $a \varphi \left(\frac{x'}{L} \right)$ – параметр, характеризующий деформацию рабочей поверхности подшипниковой втулки; $\operatorname{tg} \alpha'$ – угловой коэффициент линейного контура; ω' и a' – соответственно частота и амплитуда контурных возмущений, описывающих степень отклонения ползуна от прямолинейного контура.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx} + Nv - A; \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^{*2}} = 0; \\ \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

где $N = \frac{\sigma' B h_0^2}{\mu' u^*}$ – число Гартмана; $A = \frac{\sigma' B E h_0^2}{\mu' u^*}$ – величина, обусловленная

наличием электрического поля.

С учетом перехода к безразмерным величинам уравнений контуров $C_1, - C_3$ имеем:

в смазочном слое: $v_{y'} = \varepsilon u^* u', v_{x'} = u^* v, \varepsilon = h_0/L, y = h_0 y', x' = Lx,$
 $p = p^* p', \sigma' = \sigma, p^* = \mu u^* L/h_0^2, ;$

в пористом слое: $x = Lx^*, y = Ly^*, P = p^* P';$

в упругом слое: $y' = (h_1 - h_0) y, x' = Lx, u'_{y'} = \tilde{u} u_y, u'_{x'} = \tilde{u} u_x, \quad (2)$

где $\tilde{u}$ – характерная величина вектора перемещений.

$$1 + \eta x = H_1(x);$$

$$1 + \eta x + \eta_1 \varphi(x) - \eta_3 \sin \omega x = H_2(x);$$

$$\frac{h_1}{\delta_1} + \eta_2 x = H_3(x), \quad (3)$$

$$\text{где } \eta = \frac{Ltg\alpha}{h_0}; \quad \eta_1 = \frac{a}{h_0}; \quad \eta_2 = \frac{Ltg\alpha}{\delta_1}; \quad \eta_3 = \frac{a'}{h_0}; \quad \delta_1 = h_1 - h_0.$$

Система (1) решается с учетом следующих граничных условий для слоев:
смазочного

$$v = 0, u = 0 \text{ при } y = 1 + \eta x + \eta_1 \varphi(x) - \eta_3 \sin \omega x = H_2(x);$$

$$v = -1, u = 0 \text{ при } y = 0, p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}; \quad (4)$$

(равенство давлений в начальном и конечном сечениях);
пористого

$$p = P \Big|_{y^*=0}, u \Big|_{y=0} = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0}, \frac{\partial P}{\partial y^*} \Big|_{y^*=-\frac{\tilde{H}}{L}} = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } \tilde{M} = -\frac{Lk'}{h_0^3}; \quad P - \text{значение определено в работе [11];}$$

упругого.

$$\begin{cases} M \frac{\partial u_{y'}}{\partial y} \Big|_{y=H_2(x)} = -\tilde{p}; \\ u_y \Big|_{y=H_2(x)} = 0; \\ u_x \Big|_{y=H_2(x)} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{где } M = \frac{G(1 + \alpha^*) \tilde{u}}{(1 - \alpha^*) p_a \delta_1}; \quad \alpha^* - \text{постоянная Мусхелишвили}; \quad \tilde{p} = \max_{x \in [0,1]} p.$$

Точное автомодельное решение задачи, связанной с определением полей скоростей и давлений в смазочном слое, имеет вид:

$$\begin{cases} v = \frac{\partial \psi}{\partial y} + V(x, y); \\ u = -\frac{\partial \psi}{\partial x} + U(x, y). \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где } V(x, y) = \tilde{v}(\xi); \quad U(x, y) = -\tilde{u}(\xi)h'(x); \quad \psi = \tilde{\psi}(\xi); \quad \xi = \frac{y}{H_2(x)}$$

Подставим уравнения (7) в уравнения (1) и с учетом граничных условий (4) и (5) получим

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{C}_1 \xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + 1 \right) \xi + 1, \tilde{\psi} = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi) \quad p = \tilde{C}_1 J_2(x) + \tilde{C}_2 J_3(x) + (A + N)x + \frac{p_a}{p_*} \quad (8)$$

$$\text{где } J_k(x) = \int_0^x \frac{dx}{H_2^k(x)}.$$

Решив уравнения (8) с учетом условий (6), получим:

$$U_y = -\frac{\tilde{p}}{M} y + \frac{\tilde{p}}{M} \left(\frac{h_1}{\delta_1} + \eta_2 x \right). \quad (9)$$

Для определения деформируемого адаптированного контура воспользуемся приближенной формулой $|H_2(x) - H_1(x)| \approx U_{y'} \Big|_{y=H_3(x)}.$

С учетом формул (3) окончательно определим:

$$\eta_1 \varphi(x) \approx \frac{\tilde{p}}{M}. \quad (10)$$

Тогда деформированный адаптированный контур можно описать уравнением

$$H_2(x) = \left(1 + \frac{\tilde{p}}{M} \right) (1 + \eta_4 x - \eta_5 \sin \omega x), \quad (11)$$

$$\text{где } \eta_4 = \frac{\eta}{\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M} \right)}, \quad \eta_5 = \frac{\eta_3}{\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M} \right)}.$$

С учетом равенства (11) уравнение (8) примет вид:

$$p = \left(\frac{\eta_4}{2} (x^2 - x) + \frac{h_5}{\omega} (\cos x - 1 - (\cos x - 1)x) \right) \left(\frac{\tilde{C}_1}{\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M} \right)^2} + 3(A + N) \right) + \frac{p_a}{p_*}. \quad (12)$$

Давление фильтрующегося смазочного материала в пористом слое определим с учетом равенства (12) по формуле

$$P(x, y^*) = R(y^*) + \left[\frac{1}{2} \eta_4 (x^2 - x) + \frac{\eta_5}{\omega} (\cos x - 1 - x(\cos \omega - 1)) \right] \times \left(\frac{\tilde{C}_1}{\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M} \right)^2} + 3(A + N) \right) + \frac{p_a}{p_*}. \quad (13)$$

Подставив равенство (13) в уравнение Дарси для функции $R(y^*)$ получим

$$R(y^*) = -(\eta_4 - \eta_5 \omega \cos x) \left(\frac{\tilde{C}_1}{\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2} + 3(A + N) \right) \left(\frac{y^{*2}}{2} + \frac{H}{L} y^* \right) + \frac{p_a}{p^*}. \quad (14)$$

Таким образом, решение задачи будет найдено после определения константы $\tilde{C}_1$. Интегрируя $\tilde{v} = \frac{\tilde{C}_1 \xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + 1 \right) \xi + 1$ по ξ от 0 до 1, приходим к уравнению

$$\tilde{C}_1 = \frac{6 \left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2 \left(3\tilde{M} \frac{\tilde{H}}{L} (A + N) + 1\right)}{-12\tilde{M} \frac{\tilde{H}}{L} + \left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2}. \quad (15)$$

Далее с учетом уравнения (15) представим равенство (15) в виде:

$$p = \left[\frac{\eta_4}{2} (x^2 - x) + \frac{\eta_5}{\omega} (\cos \omega x - 1 - x(\cos \omega - 1)) \right] \times \left(\frac{6}{-12 \frac{H}{L} \tilde{M} - \left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)^2} + 3(A + N) \right) + \frac{p_a}{p^*}. \quad (16)$$

Затем с учетом уравнений (8) и (16) определим основные рабочие характеристики подшипника: несущую способность и силу трения:

$$W = p^* L \int_0^1 \left(P - \frac{p_a}{p^*} \right) dx, \quad F_{TP} = \mu \int_0^1 \left(\frac{\psi''(0)}{h_3^2(x)} - \frac{\tilde{v}(0)}{h_3(x)} \right) dx. \quad (17)$$

На основании теоретических исследований работы подшипников скольжения установлены основные закономерности влияния на несущую способность и силу:

- при увеличении параметров A , характеризующего наличие электромагнитного поля и N , числа Гартмана, несущая способность увеличивается, а сила трения незначительно снижается;

- при значении $\omega = \frac{3}{2}\pi$ имеет место максимум несущей способности и минимум силы трения.

Рисунок 2 – Зависимость несущей способности и силы трения от параметров M и ω

1. Гармонина А. Н. Расчетная модель электропроводящей смазки упорного подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей // Вестник РГУПС. 2015. № 2. С. 146–153.
2. Analytical Technique for Predicting the Value of Micropolar Lubrication Criteria Providing Stable Operation of a Radial Slide Bearing / K.S. Akhverdiev, A.Yu. Vovk, M.A. Mukutadze, M.A. Savenkova // Journal of Friction and Wear, 2008, No. 2, P – 140-145.
3. Akhverdiev, K.S. Hydrodynamic Calculation of a Thrust Plain Bearing That Operates with Viscoelastic Lubricant under Turbulent Friction Conditions / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, I.S. Semenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2011, No. 4, P – 359-365.
4. Akhverdiev, K.S. Radial bearing with porous barrel / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze // Proceedings of Academic World : International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. – IRAG Research Forum : Institute of Research and Journals, 2016. – P. 28–31.
5. Mukutadze M.A. Optimization of the Supporting Surface of a Slider Bearing according to the Load-Carrying Capacity Taking into Account the Lubricant Viscosity Depending on Pressure and Temperature / M.A. Mukutadze, D. U. Khasyanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, No. 4, P – 356-361.
6. Mukutadze, M.A. Radial bearing with porous Elements / M.A. Mukutadze // Procedia Engineering 150, 2016. – P. 559-570.
7. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Расчетные модели гидродинамического вязкоупругого смазочного материала, образующегося при плавлении поверхности подшипниковой втулки, покрытой металлическим легкоплавким покрытием // Трибология – машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, С. 37-41.