Мукутадзе М.А., Мукутадзе А.М., Василенко В.В., Болгова Е.А.

Расчетная модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким и пористым покрытием

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

doi 10.18411/gq-31-07-2019-21

idsp sciencerussia-31-07-2019-21

Аннотация

В работе дается метод формирования точного решения задачи гидродинамического расчета клиновидной опоры с пористым покрытием на поверхности ползуна, работающей при наличии смазочного материала и расплава направляющей покрытой легкоплавким металлическим покрытием. На основе уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости для «тонкого слоя», уравнения неразрывности и выражения для скорости диссипации механической энергии получена аналитическая зависимость для профиля расплавленной поверхности направляющей. Кроме того, определены основные рабочие характеристики рассматриваемой пары трения.

Ключевые слова: гидродинамика, опора скольжения, вязкий несжимаемый жидкий смазочный материал, расплавленная поверхность направляющей, пористое покрытие на поверхности ползуна.

Abstract

The paper provides a method for the formation of an exact solution of the problem of hydrodynamic calculation of a wedge-shaped support with a porous coating on the surface of the slide, operating in the presence of a lubricant and a melt guide coated with a fusible metal coating. Based on the equation of motion of a viscous incompressible fluid for a “thin layer,” the equation of continuity and the expression for the rate of dissipation of mechanical energies, an analytical dependence is obtained for the profile of the molten guide surface. In addition, the main performance characteristics of the friction pair under consideration are determined.

Keywords: hydrodynamics, sliding support, viscous incompressible liquid lubricant, molten surface of the guide, porous coating on the surface of the slide.

Одним из методов решения конструктивно-эксплуатационных задач может быть применение смазывания расплавом легкоплавкого покрытия подшипников. Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, в частности в процессах формоизменения и резания металлов [1–7]. Гидродинамическому расчету системы, состоящей из «ползуна–направляющей» при расположении ползуна под углом к поверхности направляющей, в условиях отсутствия смазочного вещества, посвящено большое количество работ [8–12]. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, является низкая несущая способность. Кроме того, процесс смазывания пластичного смазочного материала не является самоподдерживающимся.

Таким образом, разработка расчетной модели подшипников скольжения, работающих на смазочных материалах в виде металлических расплавов с пористым покрытием на поверхности ползуна, представляет собой одно из перспективных направлений теоретических исследований современной трибологии.

Постановка задачи

Рассматривается клиновидная опора, состоящая из системы «ползун – направляющая». Предполагается, что поверхности ползуна покрытое с пористым слоем

и направляющей, покрытой легкоплавким металлическим покрытием, разделены слоем смазочного материала, ползун неподвижен, а направляющая, выполненная из материала с низкой температурой плавления, движется в сторону сужения зазора со скоростью u^* (рис.1)

Рис.1 Рабочая схема

В декартовой системе координат $x'o'y'$ (рис. 1) уравнение контура ползуна с пористым покрытием и расплавленной поверхности направляющей можно записать в виде

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha + \tilde{H}, \quad y' = -\eta' f'(x'). \quad (1)$$

Рассматриваются условия, когда все тепло, выделяющееся в трибоконтакте, идет на плавление покрытия поверхности направляющей.

Исходные уравнения и граничные условия

Движение смазочного материала описывается безразмерным уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для случая «тонкого слоя», уравнением неразрывности, уравнение Дарси и формулой для скорости диссипации механической энергии

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx}; \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0. \quad \frac{d\Phi(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (2)$$

где $K = \frac{2\mu_0 u^*}{h_0 L'}$

Соответствующими граничными условиями:

$$v = 0, \quad u = 0, \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x = h(x); \quad v = -1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x);$$

$$p(0) = p(1) = \frac{P_a}{P^*}.$$

$$\frac{\partial P}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \quad v = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0};$$

$$p = P \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}. \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\lg \alpha}{h_0} \quad \tilde{M} = \frac{lk}{h_0^3}$$

где

Переход к безразмерным переменным реализуется на основе следующих формул:

$$x' = lx; \quad y' = h_0 y; \quad v_{x'} = u^* v; \quad v_{y'} = u^* \frac{h_0}{l} u; \quad p' = p^* p; \quad p^* = \frac{\mu u^* l}{h_0^2}. \quad (4)$$

В пористом слое: $x' = lx^*$; $y' = h_0 y^*$; $P' = P^* P$.

В качестве малого параметра принимая K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, будем искать функцию $\Phi(x)$ в виде

$$\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) + \dots = H. \quad (5)$$

Граничные условия для безразмерных компонентов скорости u и v на контуре $y = -\Phi(x)$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} v(0 - H(x)) &= v(0) - \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} H - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} H^2 + \dots = -1; \\ u(0 - g(x)) &= u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} H - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} H^2 + \dots = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений (2) с учетом граничных условий (3) и (6) будем искать в виде рядов по степеням малого параметра K

$$v = v_0(x, y) + Kv_1(x, y) + K^2v_2(x, y) + \dots,$$

$$u = u_0(x, y) + Ku_1(x, y) + K^2u_2(x, y) + \dots$$

$$\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) - \dots, \quad p = p_0 + Kp_1(x) + K^2p_2(x) + K^3p_3(x) \dots \quad (7)$$

Выполняя подстановку (7) в систему дифференциальных уравнений (2) с учетом граничных условий (3), получим следующие уравнения с граничными условиями:

для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} = \frac{dp_0}{dx}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P_0}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_0^2}{\partial y^{*2}} = 0. \quad (8)$$

$$v_0 = 0, \quad u_0 = 0, \quad \text{при } y = 1 + \eta x; \quad v_0 = -1, \quad u_0 = 0 \quad \text{при } y = 0; \quad p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x; \quad v_0|_{y=0} = \tilde{M} \frac{\partial P_0}{\partial y^*} \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0};$$

$$p_0 = P_0 \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}, \quad (9)$$

для первого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} = \frac{dp_1}{dx}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_1^2}{\partial y^{*2}} = 0.$$

$$\frac{d\Phi_1(x)}{dx} = K \int_0^{h(x)} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2 dy; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \bigg|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); & u_1 &= \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \bigg|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \\ v_1 &= 0 & u_1 &= 0 \quad \text{при} \quad h(x) = 1 + \eta x; \\ p_1(0) &= p_1(1) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Точное решение задачи для нулевого приближения будем искать в виде

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial y} + V_0(x, y); & u_0 &= -\frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial x} + U_0(x, y); \\ \Psi_0(x, y) &= \tilde{\Psi}_0(\xi); & \xi &= \frac{y}{h(x)}; & \tilde{u}'_0(\xi) - \xi \tilde{v}'_0(\xi) &= 0; \\ V_0(x, y) &= \tilde{v}(\xi); & U_0(x, y) &= \tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(x); \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (12) в систему дифференциальных уравнений (8) с учетом граничных условий (9), получим

$$\tilde{\Psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(1 - \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi - 1, \quad (13)$$

Из условия $p_0(0) = p_0(1) = \frac{P_a}{P^*}$ с точностью до членов второго порядка малости $O(\eta^2)$ для $\tilde{C}_2$ получим следующее выражение:

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 - \frac{1}{2}\eta\right). \quad (14)$$

С учетом (14) для безразмерного гидродинамического давления имеем:

$$P_0 = \tilde{C}_1 \int_0^x \frac{dx}{h^2(x)} + \tilde{C}_2 \int_0^x \frac{dx}{h^3(x)} + \frac{P_a}{P^*} = \frac{\eta}{2} \tilde{C}_1 (x^2 - x) + \frac{P_a}{P^*} \quad (15)$$

С учетом (16) решение уравнения Дарси представлено в виде:

$$P_0(x, y^*) = R_0(y^*) + \frac{\eta}{2} \tilde{C}_1 (x^2 - x) + \frac{P_a}{P^*} \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в уравнение Дарси системы (8) для функции $R_0(y^*)$ получим:

$$R_0(y^*) = -\eta \tilde{C}_1 \left(\frac{y^{*2}}{2} + \left(1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) y^* \right) + \frac{P_a}{P^*} \quad (17)$$

Константа $\tilde{C}_1$ находится из уравнения неразрывности интегрируемого в пределах от 0 до 1.

$$\tilde{C}_1 = \frac{6}{-12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) + 1} \quad (18)$$

Тогда для гидродинамического давления для нулевого приближения получим выражение:

$$p_0 = \frac{3\eta(x^2 - x)}{-12\tilde{M}\eta\left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) + 1} + \frac{p_a}{p^*} \quad (19)$$

Для определения $\Phi_1(x)$ с учетом уравнения (13), приходим к следующему уравнению:

$$\frac{d\Phi_1(x)}{dx} = h(x) \int_0^1 \left(\frac{\psi_0''(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi. \quad (20)$$

Решая уравнения (20) с точностью до членов второго порядка малости $O(\eta^2)$, получим

$$\Phi_1(x) = \frac{\tilde{C}_1^2}{12} \left(\frac{\eta}{2} x^2 - x \right) + 4 \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 \right) + \alpha^* \quad (21)$$

Точное решение для первого приближения ищем аналогично также как для нулевого приближения, в результате имеем:

$$\tilde{\psi}_1'''(\xi) = \tilde{C}_2; \quad \tilde{v}_1''(\xi) = \tilde{C}_1; \quad \frac{dp_1}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}. \quad (22)$$

$$\tilde{\psi}_1'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi); \quad \tilde{v}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M;$$

$$M = \sup_{x \in [0;1]} \left| \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \right|_{y=0} \Phi_1(x) = \sup_{x \in [0;1]} \left| \left(\frac{1}{1+\eta x} - \frac{\eta}{4} \tilde{C}_1 (2x-1) \right) \left(\frac{\tilde{C}_1^2}{12} \left(\frac{\eta}{2} x^2 - x \right) + 4 \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 \right) + \alpha^* \right) \right|;$$

Давления в контактной зоне для первого приближения находим из уравнения

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}. \quad (23)$$

С учетом граничного условия $p_1(0) = p_1(1) = 0$ для $\tilde{C}_2$ получим следующее уравнение:

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 + \frac{\eta}{2} \right) \quad (24)$$

С учетом (24) решение уравнения Дарси представлено в виде:

$$P_1(x, y^*) = R_1(y^*) + \frac{\eta}{2} \tilde{C}_1 (x^2 - x) \quad (25)$$

Подставляя выражение (25) в уравнение Дарси системы (20) для функции $R^*(y)$ получим:

$$R_1(y^*) = -\tilde{C}_1 \eta \left(\frac{y^{*2}}{2} + \left(1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) y^* \right); \quad (26)$$

Константа $\tilde{C}_1$ находим из уравнения неразрывности, интегрируемого в пределах от 0 до 1:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6M}{-12\tilde{M}\eta\left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) + 1} \quad (27)$$

С учетом (27) давление для первого приближения::

$$P_1 = \frac{3M\eta(x^2 - x)}{-12\tilde{M}\eta\left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) + 1} \quad (28)$$

Определение основных рабочих характеристик:

$$W = p^* l \int_0^1 \left(\left(p_0 - \frac{p_a}{p^*} \right) + K p_1 \right) dx = \frac{\mu l^3 u^*}{2h_0^2} \left[\frac{3\eta}{1 - 12\tilde{M}\eta\left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right)} (1 + KM) \right]$$

$$L_{TP} = \mu \int_0^1 \left[\frac{\partial v_0}{\partial y} \Big|_{y=0} + K \frac{\partial v_1}{\partial y} \Big|_{y=0} \right] dx = \mu (1 - KM) \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) \quad (29)$$

По результатам численных расчетов построены графики, приведенные на рис. 2.

Рисунок 2 - Зависимость несущей способности и силы трения: от параметра $\tilde{M}$, характеризующего проницаемость пористого слоя, K , характеризующего скорость диссипации механической энергии и безразмерного параметра η .

Выводы. Численный анализ полученных моделей позволил установить следующее:

Следует отметить, что при формировании контура профиля ползуна параллельно оси абсцисс несущая способность интенсивно увеличивается с ростом параметра K и практически не зависит от параметра $\tilde{M}$. При этом несущая способность в этом случае в $\approx 2,5$ раза меньше, чем у ползуна с профилем под углом не равном нулю.

Зависимость силы трения L_{tr} от толщины расплавленной пленки близкая линейной в пределах 0,001 – 0,005.

Триботехнические расчетные величины уточнены в следующем порядке: сила трения на 21 %, несущая способность – 14%.

1. Кропачев Д.Ю., Гришин А.А., Масло А.Д. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий // *Литье и металлургия*. 2012. № 3(66). С. 126–127.
2. Перельман В.И. Краткий справочник химика М.-Л. : Химия, 1964.
3. Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Фишков А.А. Определение влияния режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на износостойкость покрытий // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. № 1. С. 63–66.
4. Шаповалов В.В. Применение методов физико-математического моделирования и трибоспектральной идентификации для мониторинга фрикционных механических систем / В.В. Шаповалов, А.Л. Озябкин, П.В. Харламов // *Трение и смазка в машинах и механизмах* – 2009. – № 5, С. 49–57.
5. Щербак П.Н.. Многофазовые смазки РАПС и способы их нанесения / П.Н. Щербак, В.В. Шаповалов // *Вестник машиностроения* – 2002. – № 4, С. 45–46.
6. Озябкин А.Л. Динамический мониторинг триботермодинамики фрикционных мобильных систем / А.Л. Озябкин // *Вестник донского государственного технического университета* – 2011. – Т.11. - № 5(56), С. 644–654.
7. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure / V.V. Vasilenko, E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze, V.M. Prikhodko // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – No. 19. – P. 9138 – 9148.
8. Расчетная модель клиновидной опоры скольжения, работающей на смазочном материале с расплавом / К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, Василенко В.В. // *Трение и износ. – Гомель : ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», 2018. – Т. 39, № 1. – С. 62–71.*
9. Мукутадзе, М.А. Разработка расчетной модели гидродинамического смазочного материала, образующегося при плавлении подпятника, при наличии принудительной смазки / М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, В.В. Василенко // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2018. – № 3, С. 76–83.
10. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports in turbulent friction regime // *Advances in Engineering Research (AER), volume 157 International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018)*. P. 346–353.
11. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // *Advances in Engineering Research, volume 158, International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*. P. 246–253.
12. Lagunova E.O., M.A. Mukutadze. Radial Friction Bearings Conditioned by Melt // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (ICIE 2018)*. P. 897 – 910.

Тойгамбаев С.К.

Технология восстановления гильз цилиндров двигателя КамАЗ-740 способом направленной термомеханической деформацией

*Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева
(Россия, Москва)*

doi 10.18411/gq-31-07-2019-22

idsp sciencerussia-31-07-2019-22

Аннотация

В статье представлен технологический процесс хонингования гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Даны рекомендации по режимам и оборудованию при выполнении ремонтных работ.

Ключевые слова: деформация; термомеханический; хонингование; двигатель.