
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 51: 621.891

УПОРНЫЕ ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ТРЕНИЯ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА© 2019 г. И. В. Колесников¹, Е. С. Новиков^{1,*}

¹*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия*
**e-mail: esnovickov@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.10.2018 г.

На основе представлений о турбулентном течении вязкоупругого смазочного материала, рассмотрена двухкомпонентная система смазки, состоящая из минерального масла и вязкоупругого смазочного материала, являющегося расплавом легкоплавких металлов. Представлены результаты исследований трибологических характеристик – силы трения и несущей способности узлов трения, с учетом температурной зависимости вязкости и модуля сдвига расплавленного слоя. Рассматриваются пути улучшения свойств смазок введением в них присадок и наполнителей.

DOI: 10.1134/S0235711919010024

При передаче больших мощностей червячными редукторами, шлицевыми соединениями трибосистем, в которых используется в качестве смазочного материала минеральное масло, возникают трудности из-за его недостатка, которое необходимо для предотвращения схватывания при повышении температуры рабочих поверхностей. Чтобы избежать подобных ситуаций, а также при высоких температурах и напряжениях для подшипников скольжения предлагается использовать в качестве дополнительного смазочного материала расплав легкоплавких металлов.

В качестве твердого смазочного материала (ТСМ) применяются свинец, олово, индий, литий, кадмий и другие материалы и сплавы. В настоящих исследованиях для стального трибосопряжения в качестве твердой смазки было использовано олово (температура плавления $T_{пл} = 232^\circ\text{C}$).

Известны различные технологии металлизации поверхности трибосопряжения, где особого внимания заслуживает диффузная металлизация по своей экономичности и простоте с применением стандартного оборудования [1]. Используя эту технологию, на поверхности изделий можно получить однокомпонентные и многокомпонентные диффузионные покрытия на основе разных металлических элементов.

Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, например, в процессах формоизменения и резания металлов [2–13]. Разработке расчетной модели радиальных и упорных подшипников скольжения с учетом как реологических свойств вязкоупругого, микрополярного смазочного материала, так и зависимости вязкости смазки от давления и расплава легкоплавкого покрытия посвящен ряд работ [14–20].

Однако, отсутствие исследований по определению трибологических характеристик зависимости вязкости смазочного материала и модуля сдвига для расплава от температуры снижает эффективность использования этих материалов в тяжело нагруженных узлах трения.

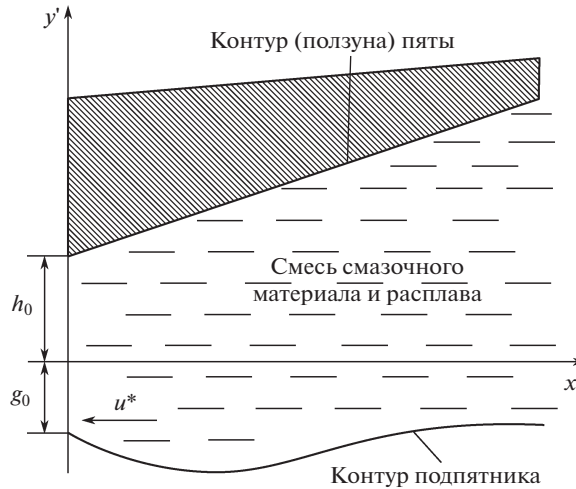


Рис. 1. Рабочая схема.

В настоящей работе решение задачи по определению триботехнических характеристик (несущей способности и силы трения) подшипника приводится для случая, когда смазка обладает вязкоупругими свойствами, с учетом зависимости вязкости смазочного материала и модуля сдвига от температуры, а также расплава легкоплавкого покрытия.

Важно не только определить трибологические параметры смазочного материала, обусловленного расплавом, и получить высококачественные смазки с добавками, но и добиться, чтобы эти смазки были устойчивы и обладали стабильными свойствами в широком температурном интервале. Для этого решение задачи было найдено на основе системы уравнений, описывающих движения несжимаемого жидкого вязкоупругого смазочного материала для случая "тонкого слоя" с учетом зависимости вязкости жидкого смазочного материала и модуля сдвига от температуры, а также уравнения неразрывности и выражения для скорости диссипации механической энергии при определении функции, обусловленной расплавом. Наиболее перспективным направлением подбора наполнителей в смазку является применение природных минералов, диспергированных до коллоидного состояния. Данными минералами выступают силикаты, которые совместимы с базовыми маслами и способны образовывать смазочную пленку на поверхности трибосопряжения [22].

Постановка задачи. Рассматриваем упорный подшипник, состоящий из системы "ползун-направляющая". Делаем ряд предположений: 1) ползун неподвижен; 2) направляющая, выполненная из материала с низкой температурой плавления, движется в сторону сужения зазора со скоростью u^* ; 3) между поверхностью ползуна и направляющей слой смазочного материала, обладающий вязкоупругими свойствами (рис. 1).

В декартовой системе координат xoy уравнение контура ползуна и расплавленной поверхности направляющей можно записать в виде

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha^*, \quad y' = -\Phi(x'), \quad (1)$$

где h_0 – толщина смазочной пленки в начальном сечении; $\Phi(x')$ – толщина расплавленной пленки в начальном сечении; α^* – угол наклона линейного контура ползуна к оси Ox' .

Предполагаем, что зависимость вязкости и модуля сдвига от давления и температуры выражается формулами $\mu' = \mu_0 e^{-\alpha(T-\bar{T}_0)}$, $G' = G_0 e^{-\alpha(T-\bar{T}_0)}$, где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; G' – модуль сдвига; μ_0 – характерная вязкость ньютоновского смазочного материала; G_0 – характерное значение модуля сдвига; α' – экспериментальная постоянная величина; $T = T(x')$ – температура в смазочном слое, \bar{T}_0 – начальная температура.

При формировании аналитического решения задачи делаем следующие предположения: Давление p постоянно по толщине смазочной пленки, заданной уравнениями (1); жидкая среда является вязкой несжимаемой жидкостью; все тепло, выделяющееся в смазочной пленке, идет на плавление поверхности материала направляющей; влияние турбулентности можно отразить с помощью коэффициента $j > 1$, на который следует умножить вязкость, чтобы получить величину эффективной вязкости (предполагаем, что коэффициент j можно выразить в виде функции числа Рейнольдса $j = 0.0139 \text{Re}^{0.657}$, где $\text{Re} = \rho u^* h_0^2 / \mu_0 l$ – число Рейнольдса, ρ – плотность, u^* – скорость движения).

Исходные уравнения и граничные условия. В качестве исходных уравнений рассмотрим систему безразмерных уравнений движения смазочного материала, обладающего вязкоупругими свойствами для случая “тонкого слоя”, уравнения неразрывности и формулу скорости диссипации энергии, для определения функции $\Phi(x)$, обусловленной расправленной направляющей

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{j\mu(x)} \frac{dp}{dx} + \frac{\beta}{j\mu(x)} \frac{d^2 p}{dx^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad -\frac{1}{j\mu(x)} \frac{d\Phi(x)}{dx} = -K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (2)$$

где u, v – компоненты вектора скорости смазочной среды; $\beta = \mu_0 u^* / Glh$ – число Дебора; p – гидродинамическое давление в смазочном слое; μ – коэффициент динамической вязкости; $K = 2\mu_0 u^* l / h_0^2 L$ – параметр, характеризующий скорость диссипации механической энергии; L – удельная теплота плавления на единицу объема.

Систему уравнений (2) решаем совместно с граничными условиями

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x = h(x); \quad u = 0, \\ v = -1 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x); \quad p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}, \quad \text{где} \quad \eta = \frac{l \operatorname{tg} \alpha^*}{h_0}.$$

Допускаем, что смазочный материал поступает в подшипник при отсутствии упругой компоненты деформации. Тогда характеристику особого состояния смазочной среды запишем следующим образом:

$$\frac{dc}{dx} = 0, \quad \frac{d^2 p}{dx^2} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0; \quad \Phi(x) = \bar{g}_0 = Kg_0 = 0 \quad \text{при} \quad x = 0, \quad (3)$$

где c – напряжения, обусловленные упругостью смазки.

Переход к безразмерным переменным реализуется по формулам

$$u' = u^* u, \quad v' = u^* \varepsilon v, \quad x' = lx, \quad y' = h_0 y, \quad T = T^* T, \quad T^* = \frac{\mu_0 u^{*2} l h^2}{I \lambda}, \quad \alpha = \alpha' T^*, \\ \varepsilon = \frac{h_0}{l}, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad G' = G_0 G, \quad C' = C^* C, \quad C^* = \frac{\mu_0 u^*}{h_0}, \quad p^* = \frac{\mu_0 u^* l}{h_0^2}.$$

Функцию $\Phi(x)$ ищем в виде $\Phi(x) = -K\Phi_1 - K^2\Phi_2 - K^3\Phi_3 - \dots = H$.

Граничные условия для безразмерных компонентов скорости u и v на контуре $y = 0 - \Phi(x)$ можно записать в виде

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

Ищем асимптотическое решение системы уравнений (2), учитывая (3), в виде

$$\begin{aligned} v &= v_0(x, y) + K v_1(x, y) + K^2 v_2(x, y) + \dots, \quad u = u_0(x, y) + K u_1(x, y) + K^2 u_2(x, y) + \dots, \\ \Phi(x) &= -K \Phi_1(x) - K^2 \Phi_2(x) - K^3 \Phi_3(x) - \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = T_0(x) + K T_1(x) + K^2 T_2(x) + K^3 T_3(x) \dots, \quad \mu = \mu_0(x) + K \mu_1(x) + K^2 \mu_2(x) + K^3 \mu_3(x) \dots$$

Подставляем (4) в систему (2) и учитывая (3), получаем следующие уравнения: для нулевого приближения

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} = \frac{1}{j\mu_0(x)} \frac{dp_0}{dx} + \frac{\beta}{j\mu_0(x)} \frac{d^2 p_0}{dx^2}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} v_0 = 0, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x; \quad v_0 = -1, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad y = 0; \\ C'_0(0) = 0; \quad p''_0(0) = 0; \quad p_0(0) = p_0(1) = \frac{p_a}{p^*}; \quad K \Phi_0(0) = K g_0 = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

для первого приближения с точностью до членов $O(K/\mu_0^2)$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} = \frac{1}{j\mu_0(x)} \left(\frac{dp_1}{dx} + \beta \frac{d^2 p_1}{dx^2} \right), \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{1}{j\mu_0(x)} \frac{d\Phi_1(x)}{dx} = K \int_0^{1+\eta x} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2 dy \quad (7)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} v_1 = \left. \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \right|_{y=0} \Phi_1(x); \quad u_1 = \left. \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \right|_{y=0} \Phi_1(x); \\ v_1 = 0, \quad u_1 = 0 \quad \text{при} \quad h(x) = 1 + \eta x; \end{aligned} \quad (8)$$

$$C'_0(0) = 0; \quad p'_1(0) = 0; \quad p_1(0) = p_1(1) = 0; \quad K \Phi_1(0) = K \tilde{\alpha}^*; \quad \Phi_1(0) = \tilde{\alpha}^*.$$

Точное автомодельное решение задачи для нулевого приближения ищем по методу Ахвердиева К.С. [21]

$$\begin{aligned} u_0 = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} + U_0(x, y), \quad v_0 = \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} + V_0(x, y), \quad \Psi_0(x, y) = \tilde{\Psi}_0(\xi), \\ \xi = \frac{y}{h(x)}, \quad V_0(x, y) = \tilde{v}(\xi), \quad U_0(x, y) = -\tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(x). \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в систему уравнений (5), (6), получаем систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_0''' = \tilde{C}_2, \quad \tilde{v}_0'' = \tilde{C}_2, \quad \tilde{u}_0' + \xi \tilde{v}_0' = 0; \\ \frac{\beta}{j\mu_0(x)} \frac{d^2 p_0}{dx^2} + \frac{1}{j\mu_0(x)} \frac{dp_0}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)} \end{aligned} \quad (10)$$

и граничные условия

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_0(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}'_0(1) = 0; \quad \tilde{u}_0(1) = 0, \quad \tilde{v}_0(1) = 0, \\ \tilde{u}_0(0) = 0, \quad \tilde{v}_0(0) = -1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_0(\xi) d\xi = 0, \quad p_0(0) = p_0(1) = \frac{p_a}{p^*}. \end{aligned}$$

Проинтегрируем (10) и получим

$$\tilde{\Psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(1 - \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi - 1, \quad \tilde{C}_1 = 6. \quad (11)$$

Из условий $p_0(0) = p_0(1) = \frac{p_a}{p^*}$ и $p_0''(0) = 0$ решая уравнение

$$\frac{\beta}{j\mu_0(x)} \frac{d^2 p_0}{dx^2} + \frac{1}{j\mu_0(x)} \frac{dp_0}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}$$

$$\text{для } \tilde{C}_2 \text{ получим } \tilde{C}_2 = \frac{6\eta - 12\eta\beta - 6 - 12\eta\beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right)}{1 + 3\eta\beta^2 - \frac{3}{2}\eta - 3\eta\beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right)}.$$

Гидродинамическое давление в смазочном слое определяем из уравнения

$$\frac{\beta}{j\mu_0(x)} \frac{d^2 p_0}{dx^2} + \frac{1}{j\mu_0(x)} \frac{dp_0}{dx} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}.$$

Для этого сначала необходимо найти $\mu_0(x)$. Продифференцировав $\mu_0(x) = e^{-\alpha \left(T - \frac{T_0}{T^*} \right)}$ получим

$$\frac{d\mu_0(x)}{dx} = \mu_0(x) \left(-\alpha \frac{dT_0}{dx} \right). \quad (12)$$

Для определения dT_0/dx используем формулу для скорости диссипации энергии

$$\frac{dT_0}{dx} = -\frac{24\mu_0\mu_0(x)u^*lh(x)}{T^*c_p h_0^2 \tilde{C}_2} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}_0''(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_0(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12) и сделав ряд преобразований, получим

$$\frac{1}{\mu_0^2(x)} \frac{d\mu_0(x)}{dx} = \frac{24\mu_0 u^* l \alpha h(x)}{T^* c_p h_0^2 \tilde{C}_2} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}_0''(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_0(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi, \quad (14)$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Интегрируя (14), получим

$$\frac{1}{\mu_0(x)} = -\tilde{D}[\Delta_1 J_3(x) + \Delta_2 J_2(x) + \Delta_3 J_1(x)],$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{D} &= \frac{24\mu_0\alpha u^*l}{T^*c_p h_0^2 \tilde{C}_2}, \quad \Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\Psi}''(\xi))^2 d\xi = \frac{\tilde{C}_2^2}{12}, \\ \Delta_2 &= 2 \int_0^1 (\tilde{\Psi}''(\xi) \cdot \tilde{v}'(\xi)) d\xi = \frac{1}{6} \tilde{C}_1 \tilde{C}_2, \quad \Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{v}'(\xi))^2 d\xi = 4, \quad J_k(x) = \int_0^x \frac{dx}{h^k(x)}. \end{aligned}$$

Функцию $\mu_0(x)$ заменим ее усредненным интегральным значением

$$\tilde{\mu}_0 = \int_0^1 \mu_0(x) dx = \int_0^1 \frac{dx}{-D[\Delta_1 J_3(x) + \Delta_2 J_2(x) + \Delta_3 J_1(x)]}.$$

С точностью до $O(\eta^2)$ для $\tilde{\mu}$ получим следующее выражение:

$$\tilde{\mu}_0 = 1 + D\alpha \left(\frac{235}{8} \eta \beta^2 \left(e^{-\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + \frac{631}{24} \eta + \frac{49}{4} - \frac{47}{4} \eta \beta \right), \quad \text{где} \quad D = \frac{24\mu_0 u^* l}{T^* c_p h_0^2}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} p_0 &= j\tilde{\mu}_0 \left[-15\eta\beta^2 + \eta\beta^2 e^{-\frac{x}{\beta}} + 6 \left(x + 2\eta \left(\beta - \frac{x^2}{2} \right) \right) + \right. \\ &\left. + 15\eta x - 6x + 6\eta\beta x - 15\eta\beta^2 x \left(e^{-\frac{1}{\beta}} - 1 \right) - 18\eta \left(\beta x - \frac{x^2}{2} \right) \right] + \frac{p_a}{p^*}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для определения $\Phi_1(x)$ с учетом уравнения (11), придем к уравнению

$$\frac{d\Phi_1}{dx} = j\tilde{\mu}_0 h(x) \int_0^1 \left(\frac{\Psi_0''(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_0(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi. \quad (16)$$

Интегрируем уравнение (16) и получаем

$$\Phi_1(x) = j\tilde{\mu}_0 \left[\int_0^x \frac{\Delta_1 dx}{h^3(x)} + \int_0^x \frac{\Delta_2 dx}{h^2(x)} + \int_0^x \frac{\Delta_3 dx}{h(x)} \right]. \quad (17)$$

Решая уравнения с учетом $K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}^*$, получим

$$\Phi_1(x) = j\tilde{\mu}_0 \left[\left(x - \frac{3}{2} \eta x^2 \right) \frac{\tilde{C}_2^2}{12} + \tilde{C}_2 \left(x - \eta x^2 \right) + 4 \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 \right) + \tilde{\alpha}^* \right].$$

Точное решение по методу Ахвердиева К.С. для первого приближения ищем в виде [21]

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{\partial \Psi_1}{\partial x} + U_1(x, y), \quad v_1 = \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} + V_1(x, y), \quad \Psi_1(x, y) = \tilde{\Psi}_1(\xi), \\ \xi &= \frac{y}{h(x)}, \quad V_1(x, y) = \tilde{v}(\xi), \quad U_1(x, y) = -\tilde{u}_1(\xi) \cdot h'(x). \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляем (18) в систему (7), (8), получаем систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1'''(\xi) &= \tilde{C}_2, \quad \tilde{v}_1'' = \tilde{C}_1, \quad \tilde{u}_1' + \xi \tilde{v}_1' = 0, \\ \frac{\beta}{j\mu_1(x)} \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{1}{j\mu_1(x)} \frac{dp_1}{dx} &= \frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)}, \end{aligned}$$

и граничные условия

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(0) = 0; \quad \tilde{\Psi}'_1(1) = 0; \quad \tilde{u}_1(1) = 0; \quad \tilde{v}_1(1) = 0; \\ \tilde{v}_1(0) = M; \quad \tilde{u}_1(0) = 0; \quad \int_0^1 \tilde{v}_1(\xi) d\xi = 0; \quad p_1(0) = p_1(1) = 0. \end{aligned}$$

Интегрируя получаем

$$\tilde{\Psi}'_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_1}{2}\xi^2 - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M\right)\xi + M, \quad \tilde{C}_1 = 6M,$$

где

$$\begin{aligned} M = \sup_{x \in [0;1]} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \Phi_1(x) = \\ = \sup_{x \in [0;1]} \left[\left[1 - \eta x + 6\eta x - \frac{15}{2}\eta - 6\eta\beta + \frac{15}{2}\eta\beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + 9\eta(\beta - x) \right] \times \right. \\ \left. \times j\tilde{\mu}_0 \left[\left(x - \frac{3}{2}\eta x^2 \right) \frac{\tilde{C}_2^2}{12} + \tilde{C}_2(x - \eta x^2) + 4 \left(x - \frac{1}{2}\eta x^2 \right) + \tilde{\alpha} \right] \right]. \end{aligned}$$

Из условия $p_1(0) = p_1(1) = 0$ для \tilde{C}_2 получим

$$\tilde{C}_2 = M(15\eta - 6 + 6\eta\beta) - 15\eta\beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right).$$

Для определения значения \tilde{C}_2 и гидродинамического давления p_1 необходимо найти $\mu_1(x)$. Продифференцировав $\mu_1(x) = e^{-\alpha \left(T_1 - \frac{T_0}{T^*} \right)}$ по x , получим

$$\frac{d\mu_1(x)}{dx} = -\alpha \left(\mu_0(x) \frac{dT_1}{dx} + \mu_1(x) \frac{dT_0}{dx} \right). \quad (19)$$

Для определения dT_1/dx применяем формулу для скорости диссипации энергии

$$\frac{dT_1}{dx} = -\frac{48\mu_0\mu_1(x)u^*h(x)}{T^*c_\rho h_0^2 \tilde{C}_2} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''_0(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_0(\xi)}{h(x)} \right) \left(\frac{\tilde{\Psi}'_1(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_1(\xi)}{h(x)} \right) d\xi. \quad (20)$$

Подставляя (13) и (20) в (19) и сделав ряд преобразований, получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu_0\mu_1(x)} \frac{d\mu_1(x)}{dx} = \frac{48\mu_0 u^* l \alpha}{T^* c_\rho h_0^2 \tilde{C}_2} \left(\frac{\tilde{\Delta}_1}{h^3(x)} + \frac{\tilde{\Delta}_2}{h^2(x)} + \frac{\tilde{\Delta}_3}{h^2(x)} + \frac{\tilde{\Delta}_4}{h(x)} \right) + \\ + \frac{24\mu_0 u^* l \alpha}{T^* c_\rho h_0^2 \tilde{C}_2} \left(\frac{\Delta_1}{h^3(x)} + \frac{\Delta_2}{h^2(x)} + \frac{\Delta_3}{h(x)} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_1 = \int_0^1 \tilde{\Psi}''_0(\xi) \tilde{\Psi}'_1(\xi) d\xi; \quad \tilde{\Delta}_2 = \int_0^1 \tilde{\Psi}''_0(\xi) \tilde{v}'_1(\xi) d\xi; \\ \tilde{\Delta}_3 = \int_0^1 \tilde{\Psi}'_1(\xi) \tilde{v}'_0(\xi) d\xi; \quad \tilde{\Delta}_4 = \int_0^1 \tilde{v}'_0(\xi) \tilde{v}'_1(\xi) d\xi. \end{aligned}$$

Проинтегрируем (21) и заменим $\mu_1(x)$ ее усредненным интегральным значением и получим

$$\frac{1}{\tilde{\mu}_0} \ln |\tilde{\mu}_1| = \frac{24\mu_0 l^* l \alpha}{T^* c_p h_0^2} \left[\frac{\tilde{C}_2}{6} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{2} \right) + \frac{2M\tilde{C}_2}{\tilde{C}_2} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{3} \right) - 1 + \frac{2\eta}{3} + \frac{8M}{\tilde{C}_2} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{6} \right) + \left(\frac{235}{8} \eta \beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + \frac{631}{24} \eta + \frac{49}{4} - \frac{47}{4} \eta \beta \right) \right].$$

С точностью до членов $O(\eta^2)$ для $\tilde{\mu}_1$, получим

$$\tilde{\mu}_1 = 1 - \exp \left[-\alpha \tilde{\mu}_0 \left(1 - D \left[\frac{\tilde{C}_2}{6} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{2} \right) + \frac{2M\tilde{C}_2}{\tilde{C}_2} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{3} \right) - 1 + \frac{2\eta}{3} + \frac{8M}{\tilde{C}_2} \left(\frac{1-\eta}{2} - \frac{\eta}{6} \right) - \left(\frac{235}{8} \eta \beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + \frac{631}{24} \eta + \frac{49}{4} - \frac{47}{4} \eta \beta \right) \right] \right) \right].$$

Тогда из условия $p_1(0) = p_1(1) = 0$ и $p_1''(0) = 0$ получим

$$p_1 = j \tilde{\mu}_1 \left[15\eta \beta^2 \left(e^{\frac{x}{\beta}} - 1 \right) (1-x) + 6M \left(x + 2\eta \left(\beta - \frac{x^2}{2} \right) \right) + M \left(15\eta x - 6x + 6\eta \beta x - 18\eta \left(\beta x - \frac{x^2}{2} \right) \right) \right]. \quad (22)$$

Результаты исследования и их обсуждения. Определим основные триботехнические характеристики подшипника. С учетом (5), (7), (15) и (22) для несущей способности и силы трения получим

$$\begin{aligned} W &= \frac{\mu_0 l^2 u^*}{h_0^2} \int_0^1 \left(p_0 - \frac{p_a}{p^*} + K p_1 \right) dx = \\ &= \frac{\mu_0 l^2 u^* j}{h_0^2} \left\{ \tilde{\mu}_0 j \left[-15\eta \beta^2 - \eta \beta \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + 6 \left(\frac{1}{2} + 2\beta \left(\beta - \frac{1}{6} \right) \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{15}{2} \eta - 3 + 3\eta \beta - \frac{15}{2} \eta \beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) - 18\eta \left(\frac{\beta}{2} - \frac{1}{6} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + K \tilde{\mu}_1 \left[15\eta \beta \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 2 \right) - 15\eta \beta^2 \left(-\frac{1}{\beta} e^{\frac{1}{\beta}} - \frac{1}{\beta^2} \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) + \frac{1}{2} \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 6M \left(\frac{1}{2} + 2\eta \left(\beta - \frac{1}{6} \right) \right) + M \left(\frac{15}{2} \eta - 3 + 3\eta \beta - 18\eta \left(\frac{\beta}{2} - \frac{1}{6} \right) \right) \right] \right\}, \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{mp} &= \frac{\mu_0 l^2 u^*}{h_0} \int_0^1 \left[\frac{\partial v_0}{\partial y} \Big|_{y=0} + K \frac{\partial v_1}{\partial y} \Big|_{y=0} \right] dx = \\ &= \frac{\mu_0 l^2 u^* j}{h_0} \left[\left(1 - \frac{13\eta}{2} + 3\eta \beta \right) (\tilde{\mu}_0 + \tilde{\mu}_1 K M) + \frac{15}{2} \eta \beta^2 \left(e^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right) (\tilde{\mu}_0 + \tilde{\mu}_1 K) \right]. \end{aligned}$$

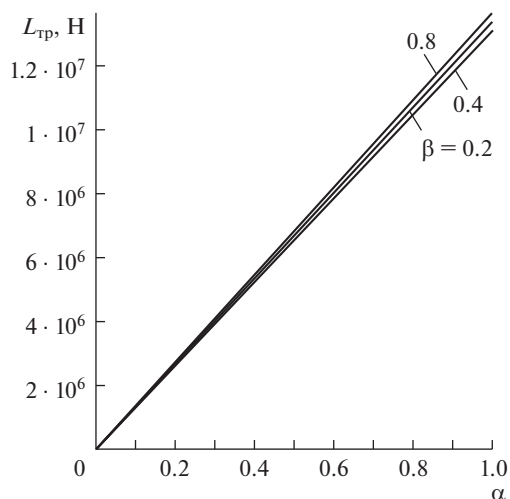


Рис. 2. Зависимость силы трения от параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры.

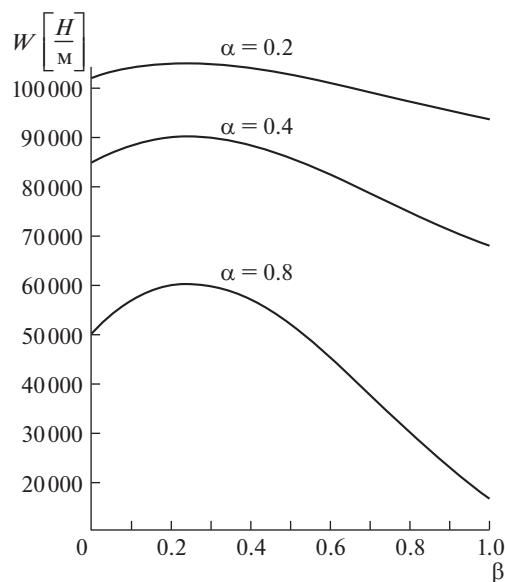


Рис. 3. Зависимость несущей способности от числа Дебора β , определяемым модулем упругости.

Входные параметры для расчета несущей способности и силы трения, определяемые выражениями (23), следующие:

$$\eta = 0.3-1, \quad \omega = 0-1, \quad K = 0.000022-0.0052, \quad u^* = 1-3 \text{ м/с},$$

$$\beta = 0-1, \quad \alpha = 0-1, \quad \mu_0 = 0.085 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}, \quad p = 0,5-16 \text{ МПа},$$

$$p_a = 0.08-0.101325 \text{ МПа}, \quad h_0 = 10^7-2 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

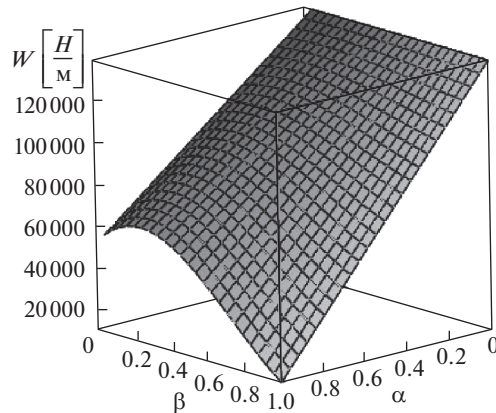


Рис. 4. Зависимость несущей способности от числа Дебора β , определяемым модулем упругости, и от параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры.

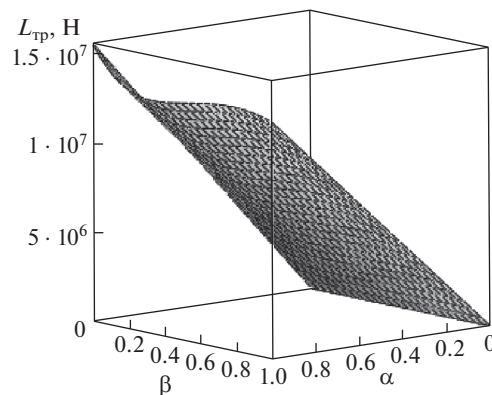


Рис. 5. Зависимость силы трения от числа Дебора β , определяемым модулем упругости, и от параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов несущей способности и силы трения от параметра α , характеризующего вязкость μ и параметра β , определяющего модуль упругости G твердого смазочного материала, а на рис. 4 и 5 показана такая же зависимость в трехмерном измерении.

Исследования влияния присадок. Учитывая, что рассматриваемая трибосистема работает с твердым смазочным материалом ЛЗ-ЦНИИ (ГОСТ 19791-74), работоспособность которого ограничена температурным интервалом от -40 до 100°C , был проведен целенаправленный поиск наноразмерных присадок для него, исследуя фазовые диаграммы ИК-спектроскопическим методом. Это позволило выбрать в качестве присадок поли и гетерополифосфаты [22].

Наноразмерные компоненты получали на мельнице MikroCer, размеры которых были до $45\text{--}50$ нм. Для измерения размера была использована дисковая центрифуга CPS.

Следует отметить, что особенностью механического измельчения является эффект механоактивации – автовозбуждения активности вещества на стадии разрушения. Проведенные трибологические исследования показали более высокую износостойкость смазки с добавлением фосфоровольфрамата по сравнению с исходной ЛЗ-ЦНИИ за счет образования пленки на трибоповерхности.

Методом ИК-Фурье НПВО спектроскопии были проведены исследования пленок переноса, образованных в результате фрикционного контакта на торцевой машине трения в присутствии смазочной среды. На ИК-спектрах, снятых после работы трибосоприжения в течение 8 часов, кроме полос смазочного материала появляются линии 1060, 1150, 1695, 1740 и 3500–3670 см^{-1} , соответствующие колебаниям связей C–O–C, C=O и O–H. В случае чистого смазочного материала после 24 часов работы трибосоприжения смазочная пленка практически не обнаруживается. Следует отметить, что пленка сохраняется на поверхности трибоконтакта даже после 8 часов работы трибосистемы. Это позволяет утверждать, что присадки значительно продлевают ресурс службы смазочного материала.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие

Выводы. Получена уточненная расчетная модель упорного подшипника скольжения, работающего в условиях гидродинамического смазывания расплавом легкоплавкого покрытия с учетом зависимости вязкости и модуля сдвига от температуры. Доказано, что общий эффект воздействия температуры на эти параметры заметно отклоняется от правила аддитивности и показывает: с увеличением параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры, сила трения линейно увеличивается и практически не зависит от параметра β , определяемого модулем упругости (рис. 2); с увеличением параметра β , определяемого модулем упругости, несущая способность уменьшается, имея экстремальный характер с небольшим максимумом в области $\beta = 0.2$; при этом с увеличением параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры, несущая способность значительно снижается.

При рассмотрении трибосистемы, имеющей на трибоконтакте двухкомпонентную систему смазки, состоящей из минерального масла и вязкоупругого смазочного материала, обусловленного расплавом легкоплавких металлов можно получить трехкомпонентную систему смазки с получением пленки переноса на поверхности трения путем физико-химической модификации смазки нанодобавками из гетерополифосфатов. По мере работы трибосистемы в температурном интервале до 100°C смазка обеспечивает достаточно низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. По мере увеличения температуры (до 200°C) роль смазки выполняет пленка переноса, а с ростом температуры (более 200°C) функции начинает выполнять твердый смазочный материал.

Такой подход к расчету клиновидных опор скольжения в теории трения и износа реализован впервые. Правомочность его подтверждается результатами эксперимента и полученные данные можно использовать при разработке и конструировании опор скольжения.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (идентификатор проекта RFME-FI60718X0203).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов А.Г., Артемьев В.П., Чалов А.А. Исследование защитных свойств никельсодержащих диффузионных покрытий, получаемых при диффузионной металлизации стальных изделий, в сероводородных средах // Нефтегазовое дело. 2016. Доступ: http://ogbus.ru/authors/Sokolov/Sokolov_1.pdf.

2. *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.
3. *Уилсон.* Смазка с расплавом // *Проблемы трения и смазки*. 1976. № 1. 19 с.
4. *Беретта, Ниро, Сильвестри.* Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации // *Труды Америк. о-ва инж.-мех.* 1992. № 1. С. 86–90.
5. *Физические величины.* Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. *Хавин В.Я.* Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1991.
7. *Перельман В.И.* Краткий справочник химика. М.-Л.: Химия, 1964.
8. *Справочник по пайке.* М.: Машиностроение, 1984.
9. *Котельническая Л.И., Демидова Н.Н.* Расчет радиальных подшипников с эффективной работой на смазке с расплавом в турбулентном режиме // *Вестник РГУПС*. 2002. № 2. С. 18–23.
10. *Приходько В.М., Котельническая Л.И.* Математическая модель гидродинамической смазки при плавлении опорной поверхности радиального подшипника // *Трение и износ*. Гомель. 2001. Т. 22. № 6. С. 606–608.
11. *Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Леванов И.Г.* Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчете сложнагруженных узлов трения поршневых и роторных машин // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2011. № 7. С. 22–30.
12. *Прокопьев В.Н., Бояршинова А.К., Задорожная Е.А.* Динамика сложнагруженного подшипника, смазываемого неньютоновской жидкостью // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2005. № 6. С. 108–114.
13. *Прокопьев В.Н., Задорожная Е.А., Караваев В.Г., Леанов И.Г.* Совершенствование методики расчета сложнагруженных подшипников скольжения, смазываемых неньютоновскими маслами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 1. С. 63–67.
14. *Василенко В.В., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А.* Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала // *Интернет-журнал “НАУКОВЕДЕНИЕ”*. 2017. Т. 9. № 5. <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>
15. *Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Василенко В.В.* Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления // *Вестник Донского гос. технич. ун-та*. 2017. Т. 17. № 3(90). С. 27–37.
16. *Lagunova E.O.* Wedge-Shaped Sliding Supports Operating on Viscoelastic Lubricant Material Due to the Melt, Taking Into Account the Dependence of Viscosity and Shear Modulus on Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562. 2017. V. 12. № 19. P. 9120–9127.
17. *Lagunova E.O.* Radial Plain Bearings Operating on Viscoelastic Lubricant Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of the Viscosity of the Lubricant and the Shear Modulus on the Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562. 2017. V. 12. № 19. P. 9128–9137.
18. *Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M.* Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562. 2017. V. 12. № 19. P. 9138–9148.
19. *Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В.* Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленные расплавом // *Вестник РГУПС*. 2017. № 3 (67). С. 8–15.
20. *Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Solop K.S.* Working Out of an Analytical Model of an Axial Bearing Taking into Account Dependence of Viscous Characteristics of Micropolar Lubrication on Pressure and Temperature // *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562. 2017. V. 12. № 14. P. 4644–4650.
21. *Ахвердиев К.С., Колесников В.И., Приходько В.М.* Основы совершенствования тяжело нагруженных узлов трения транспортных систем. Монография. М.: Маршрут, 2005.
22. *Колесников И.В.* Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения. М.: ВИНТИ РАН, 2017. 384 с.