
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 51:621.891

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛИНОВИДНОЙ ОПОРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ
С ЛЕГКОПЛАВКИМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ**© 2020 г. М. А. Мукутадзе^{1,*}, Д. У. Хасьянова^{2,**}, А. М. Мукутадзе¹¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: murman1963@yandex.ru

**e-mail: dinara.khasyanova@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

В статье представлен метод формирования точного автомодельного решения задачи гидродинамического расчета клиновидной опоры (ползун, направляющая), которая работает при наличии смазочного материала, легкоплавкого металлического покрытия на поверхности направляющей и пористого слоя на поверхности ползуна с учетом зависимости вязкости смазочного материала и проницаемости пористого слоя от давления.

Ключевые слова: гидродинамика, опора скольжения (ползун, направляющая), расплавленная поверхность направляющей, вязкость смазочного материала, проницаемость пористого слоя

DOI: 10.31857/S0235711920040100

В современном машиностроении трибоузлы для новых машин проектируются с учетом увеличивающихся статических и ударных нагрузок, действующих на опоры скольжения, которые определяются современными инженерными методами. Одним из важнейших равноправным конструктивным элементом подшипников жидкостного трения является смазочная среда.

Вариантом решения конструктивно-эксплуатационных задач может быть использование в качестве покрытия поверхности направляющей смазывание ее легкоплавким металлическим сплавом, а также применение пористого покрытия на поверхности ползуна.

Диффузионная металлизация из среды легкоплавких жидкометаллических растворов основана на явлении селективного изотермического переноса металлических элементов на металлические материалы [1–4]. Технологически данный процесс осуществляется путем погружения и выдержки изделий в легкоплавком расплаве, содержащем в растворенном состоянии элемент, на базе которого формируются диффузионные покрытия.

Использование данной технологии позволяет получать на поверхности изделий однокомпонентные и многокомпонентные диффузионные покрытия на базе различных металлических элементов.

Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, в частности, в процессах формоизменения и резания металлов [5–7]. Гидродинамическому расчету системы, состоящей из ползуна при его расположении под углом к поверхности направляющей, в условиях отсутствия смазочного вещества, и без учета зависимости

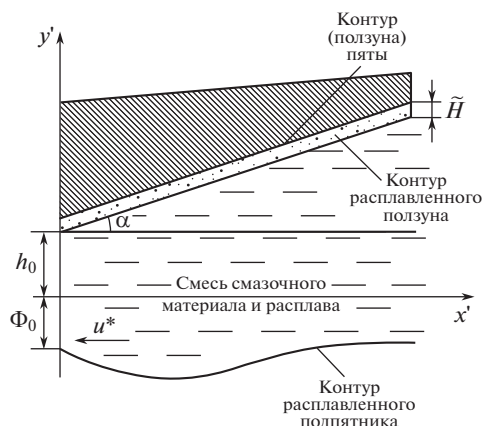


Рис. 1. Рабочая схема.

вязкости смазочного материала и проницаемости пористого покрытия от давления, посвящено большое количество работ [8–10]. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, пористым покрытием на поверхности ползуна, является низкая несущая способность. Кроме того, процесс смазывания не является самоподдерживающимся.

Таким образом, разработка расчетной модели подшипников скольжения, работающих на смазочных материалах в виде металлических расплавов, а также пористого покрытия на поверхности ползуна с учетом вышеуказанных аспектов функционирования, представляет собой одно из перспективных направлений современной теоретической трибологии. Научная новизна предлагаемого решения заключается в оценке влияния параметра, обусловленного расплавом направляющей, и параметров, которые характеризуют зависимость вязкости смазочного материала и проницаемость пористого слоя от давления, обеспечивающих опорам скольжения аномально низкий коэффициент трения.

Постановка задачи. В статье рассматривается клиновидная опора, состоящая из системы “ползун–направляющая”. Предполагается, что поверхность ползуна, покрытая пористым слоем, и направляющей, покрытая легкоплавким металлическим расплавом, разделены слоем смазочного материала. При этом ползун неподвижен, а направляющая, выполненная из материала с низкой температурой плавления, движется в сторону сужения зазора со скоростью u^* (рис. 1).

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

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

где $\Phi(x) = \eta' f'(x')$ – функция, характеризующая толщину расплава поверхности направляющей, покрытой легкоплавким металлическим сплавом, Φ_0 – толщина расплавленной пленки легкоплавкого металлического сплава в начальном сечении; α – угол наклона линейного контура ползуна к оси ox' ; h_0 – толщина смазочной пленки в начальном сечении; l – длина неподвижной рабочей поверхности подшипника (ползуна).

Зависимость вязкости смазочного материала и проницаемости пористого слоя от давления задается следующей зависимостью

$$\mu' = \mu_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad k' = k_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость ньютоновского смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; $\tilde{\alpha}$ – экспериментальная постоянная величина, k_0 – характерная проницаемость пористого слоя; k' – проницаемость пористого слоя.

Исходные уравнения и граничные условия. Движение смазочного материала описывается безразмерным уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для “тонкого слоя”, уравнением неразрывности, уравнением Дарси и формулой скорости диссипации механической энергии для определения функции $\Phi(x)$, обусловленной расплавом поверхности направляющей

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx}; \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0; \quad \frac{d\Phi(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (3)$$

с соответствующими граничными условиями

$$\begin{aligned} v = 0, \quad u = 0, \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x = h(x); \\ v = -1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad y = \Phi(x); \quad p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}. \\ \frac{\partial P}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \\ p = P \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\eta = \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{h_0}$, $\tilde{M} = \frac{lk}{h_0^3}$, u и v – компоненты вектора скорости смазочной среды;

$K = \frac{2\mu_0 u^*}{h_0 L'}$ – параметр, обусловленный расплавом и скоростью диссипации механической энергии, L' – удельная теплота плавления на единицу объема.

Переход к безразмерным переменным обусловлен следующими формулами:

$$\begin{aligned} x' = lx; \quad y' = h_0 y; \quad v_{x'} = u^* v; \quad v_{y'} = u^* \frac{h_0}{l} u; \\ p' = p^* p; \quad p^* = \frac{\mu_0 u^* l}{h_0^2}; \quad \mu' = \mu_0 \mu; \quad \alpha = p^* \tilde{\alpha}. \end{aligned}$$

В пористом слое

$$x' = lx^*; \quad y' = h_0 y^*; \quad P' = P^* P; \quad k' = k_0 k. \quad (5)$$

Вводя обозначение $z = e^{-\alpha p}$ и дифференцируя обе части равенства, получим $\frac{dz}{dx} = -\alpha e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx}$ или $e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz}{dx}$. Тогда уравнения (3) и (4) примут вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz}{dx}; \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0; \quad z \frac{dg(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 dy \quad (6)$$

с соответствующими граничными условиями:

$$v = 0, \quad u = 0, \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x;$$

$$\begin{aligned}
v = -1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x); \quad z(0) = z(1) = e^{-\frac{\alpha P_0}{P^*}}; \\
\frac{\partial P}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \\
p = P \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x.
\end{aligned} \tag{7}$$

Принимая в качестве малого параметра K , обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии найдем функцию $\Phi(x)$

$$\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) + \dots = H(x). \tag{8}$$

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

$$\begin{aligned}
v(0 - H(x)) = v(0) - \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{y=0} H - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)_{y=0} H^2 + \dots = -1; \\
u(0 - H(x)) = u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} H - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} H^2 + \dots = 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений (6) с учетом граничных условий (7) и (9) будем искать в виде рядов по степеням малого параметра K

$$\begin{aligned}
v(x, y) = v_0(x, y) + K v_1(x, y) + K^2 v_2(x, y) + \dots, \\
u(x, y) = u_0(x, y) + K u_1(x, y) + K^2 u_2(x, y) + \dots, \\
\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) - \dots, \\
z(x, y) = z_0(x) + K z_1(x) + K^2 z_2(x) + K^3 z_3(x) + \dots
\end{aligned} \tag{10}$$

Выполняя подстановку (10) в систему дифференциальных уравнений (6) с учетом граничных условий (7), получим следующие уравнения:

– для нулевого приближения

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_0}{dx}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 P_0}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_0^2}{\partial y^{*2}} = 0. \tag{11}$$

С граничными условиями

$$v_0 = 0, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x;$$

$$\begin{aligned}
v_0 = -1, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad y = 0; \quad z_0 = z_0(1) = e^{-\frac{\alpha P_0}{P^*}}, \\
\frac{\partial P_0}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u_0|_{y=0} = \tilde{M} \frac{\partial P_0}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \\
p_0 = P_0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x,
\end{aligned} \tag{12}$$

– для первого приближения

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_1}{dx}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_1^2}{\partial y^{*2}} = 0, \quad z_0 \frac{dg_1(x)}{dx} = \int_0^{1+\eta x} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2 dy. \tag{13}$$

С граничными условиями

$$v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)_{y=0} \cdot \Phi_1(x);$$

$$\begin{aligned}
 v_1 = 0, \quad u_1 = 0 \quad \text{при} \quad h(x) = 1 + \eta x; \quad z_1(0) = z_1(1) = 0; \\
 \frac{\partial P_1}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u_1 = \tilde{M} \frac{\partial P_0}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \\
 p_1 = P_1 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Решение задачи для нулевого приближения. Точное решение задачи для нулевого приближения найдем в виде

$$\begin{aligned}
 v_0 = \frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial y} + V_0(x, y); \quad u_0 = -\frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial x} + U_0(x, y); \quad \Psi_0(x, y) = \tilde{\Psi}_0(\xi); \\
 \xi = \frac{y}{h(x)}; \quad \tilde{u}'_0(\xi) + \xi \tilde{v}'_0(\xi) = 0; \quad V_0(x, y) = \tilde{v}(\xi); \quad U_0(x, y) = \tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(x).
 \end{aligned} \tag{15}$$

Подставляя уравнение (15) в систему дифференциальных уравнений (11) с учетом граничных условий (12), получим

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(1 - \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi - 1, \quad \tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 + \frac{1}{2}\eta\right), \\
 z_0 = \alpha \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2}(x - x^2) + e^{-\alpha \frac{P_a}{p^*}}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Определение безразмерного гидродинамического давления. Используя асимптотическое разложение для определения давления P с точностью $O(\eta^2)$ приходим к с приближенному уравнению

$$p_0 = \left(1 + \alpha \frac{P_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_a}{p^*}\right)^2\right) \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2}(x^2 - x) + \frac{P_a}{p^*} = 0. \tag{17}$$

С учетом (17), решение уравнения Дарси представим в виде

$$P_0(x, y^*) = R_0(y^*) + \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2}(x^2 - x) \left(1 + \alpha \frac{P_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_a}{p^*}\right)^2\right) + \frac{P_a}{p^*}. \tag{18}$$

Тогда для гидродинамического давления с нулевым приближением получим выражение

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

С учетом уравнения (19) для z_0 получим

$$z_0 = \frac{3\eta(x - x^2)}{-12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{P_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_a}{p^*}\right)^2\right) \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0}\right) + 1} + e^{-\alpha \frac{P_a}{p^*}}. \tag{20}$$

Для определения $\Phi_1(x)$ с учетом уравнения (13), получим уравнение

$$\frac{d\Phi_1(x)}{dx} = \frac{h(x)}{z_0} \int_0^1 \left(\frac{\Psi''_0(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{v}'_0(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi. \tag{21}$$

Решая уравнения (21) с точностью до членов второго порядка малости $O(\eta^2)$ и $K\Phi(0) = k\alpha^*$, получим

$$\Phi_1(x) = \frac{1}{z_0} \left[\tilde{C}_1 \left(-x + \frac{\eta}{2} x^2 \right) + 4 \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 \right) \right] + \alpha^*. \quad (22)$$

Решение задачи для первого приближения. Решение для первого приближения (как для нулевого приближения) имеет вид

$$\tilde{\psi}_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_1 \xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} - M \right) \xi + M, \quad (23)$$

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 + \frac{1}{2} \eta \right); \quad z_1 = \alpha \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2} (x - x^2);$$

$$p_1 = \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2} (x - x^2). \quad (24)$$

С учетом (24) решение уравнения Дарси примет вид

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

Гидродинамическое давление для первого приближения

$$P_1 = \frac{3\eta(x - x^2)}{12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1}. \quad (26)$$

Далее определяем основные рабочие характеристики

$$\begin{aligned} W &= p^* l \int_0^1 \left(p_0 - \frac{p_a}{p^*} + K p_1 \right) dx = \\ &= \frac{\mu_0 u^* l^2 \eta}{2h_0^2} \left[\frac{\left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right)^2}{12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) - 1} + \frac{KM}{12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1} \right], \quad (27) \\ L_{\text{тр}} &= \mu \int_0^1 \left[\frac{\partial v_0}{\partial y} \Big|_{y=0} + K \frac{\partial v_1}{\partial y} \Big|_{y=0} \right] dx = \mu_0 \left(1 - \alpha p - \frac{\alpha^2 p}{2} \right) \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) (1 + KM). \end{aligned}$$

Экспериментальные исследования. На базе полученных расчетных моделей проведено экспериментальное исследование, в результате которого определена область эксплуатации трибосистемы в виде диапазона нагрузочно-скоростных режимов, а также основные триботехнические характеристики.

Рассматривая смазочный материал как часть единой трибосистемы, авторами были проведены исследования по управлению состоянием поверхностных пленок, которые формируются между контактируемыми поверхностями. Такие пленки являются результатом трибохимического обмена между смазочным материалом и поверхностями.

В экспериментальном исследовании рассмотрен упорный подшипник скольжения с покрытием ползуна и легкоплавким металлическим покрытием направляющей. В результате эксперимента определена величина коэффициента трения, позволяющая судить о наличии гидродинамического режима смазывания. Также по результатам экспериментальных исследований получены значения для коэффициента трения,

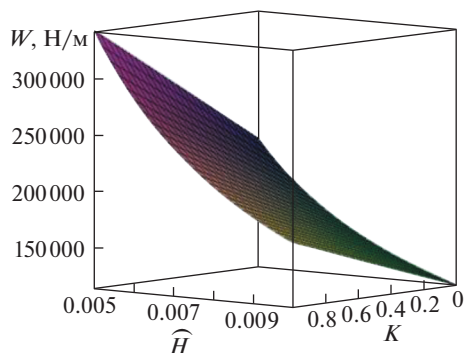


Рис. 2. График зависимости несущей способности (W) от параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии и толщины пористого слоя.

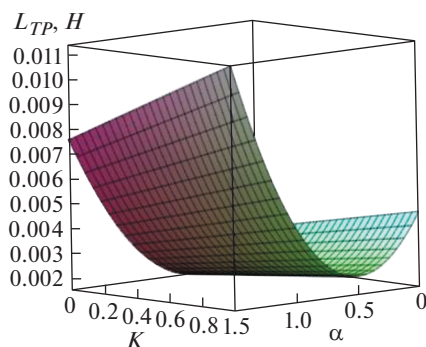


Рис. 3. График зависимости силы трения ($L_{тр}$) от параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии и параметра, характеризующего зависимость вязкости от давления α .

анализ которых показывает, что нагрузка влияет на коэффициент трения (в 2–5 раз интенсивнее скорости).

Полученные результаты и выводы. Разработаны уточненные расчетные модели упорных подшипников скольжения, которые позволяют регулировать соотношение его несущей и демпфирующей способностей путем варьирования пористости и легкоплавкого металлического покрытия. Определено оптимальное по несущей способности и силе трения сочетание пористости поверхности ползуна и легкоплавкого металлического покрытия направляющей, позволяющее увеличить несущую способность на 15–20% и снизить силу трения 10–14%. Результаты численных расчетов, полученных теоретических гидродинамических моделей, приведены на рис. 2, 3.

Установлена удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных результатов, что подтверждает достоверность разработанной теоретической модели.

В рассмотренном диапазоне конструктивных и эксплуатационных параметров трибосистем с пористым и легкоплавким металлическим покрытием проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил достоверность разработанных расчетных моделей, данные их численного анализа и показал удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных результатов.

Трибологические испытания на машинах трения показали значительное (до 25%) уменьшение пятна износа и более длительное сохранение смазочной пленки (до 50%).

Полученные результаты можно использовать в трибоузлах, где принудительная подача смазочного материала невозможна или связана со значительными трудностями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”. Соглашение о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1865 от 02.12.2019 г. (внутренний номер соглашения: 05.607.21.0300), проект RFMEFI60719X0300.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кропачев Д.Ю. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий / Д.Ю. Кропачев, А.А. Гришин, А.Д. Масло // *Литье и металлургия*. 2012. № 3 (66). С. 126.
2. Уилсон. Смазка с расплавом / Уилсон // *Проблемы трения и смазки*. 1976. № 1. С. 19.
3. Беретта. Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации / Беретта, Ниро, Сильвестри // *Труды Амер. о-ва инж.-мех.* 1992. № 1. С. 86.
4. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Хавин В.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1991.
6. Перельман В.И. Краткий справочник химика. М.-Л.: Химия, 1964.
7. Справочник по пайке. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984.
8. V-shaped sliding bearings using micropolar lubricants caused by a melt accounting for the dependence of lubricant viscosity and porous lauer permeability on pressure / A.N. Opatskikh, M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze // *Journal of Physics: Conference Series* 1353 (2019) 012025 IOP Publishing <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012025>
9. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M.A. Mukutadze, V.V. Vasilenko, A.M. Mukutadze, A.N. Opatskikh / *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 378 (2019) 012021 IOP Publishing <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012021>
10. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Radial Friction Bearing with a Fusible Coating in the Turbulent Friction Mode // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2019. № 48. P. 423. <https://doi.org/10.3103/S1052618819050066>