

УДК 621.822.17

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-14-21

Оценка износостойкости модифицированного радиального подшипника с учетом сжимаемости

Е. А. Болгова, аспирант, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

М. А. Мукутадзе, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

В. М. Приходько, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Полимерные композиционные материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в тяжело нагруженных низкоскоростных трибосистемах самых разных машин, обеспечивая значительные ресурсы узлов трения. Использование жидких смазочных материалов позволяет расширить скоростной диапазон их применения, поскольку обеспечивает переход от граничного трения самосмазыванием к жидкостному трению в условиях гидродинамики. Тогда во время пусков и выбегов будут работать покрытия, а в стационарном режиме – смазка. Движущийся в рабочем зазоре жидкий смазочный материал неизбежно содержит атмосферные газы, которые значительно влияют на эксплуатационные свойства смазочного материала, и в первую очередь на его сжимаемость. Поэтому введение параметра сжимаемости в модель позволяет более точно предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы подшипника. Данное исследование включает разработку и анализ математической модели микрополярного смазочного материала в подшипнике с полимерным покрытием на опорной поверхности подшипниковой втулки. Модифицированная конструкция подшипника предусматривает наличие полимерного покрытия с канавкой, что способствует улучшению распределения смазочного материала и повышению долговечности системы. Новизна работы заключается в разработке методики инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием при наличии канавки с учетом сжимаемости, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров. Целью работы является оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения при учете сжимаемости микрополярного смазочного материала. На основе уравнения движения исследуемого жидкого смазочного материала, уравнения неразрывности и уравнения состояния получены новые математические модели, учитывающие дополнительно сжимаемость смазочного материала. Результаты исследования показали, что модифицированная конструкция подшипника с нанесенным полимерным покрытием и канавкой значительно улучшает его эксплуатационные характеристики. Отмечено уменьшение коэффициента трения в сравнении с традиционными конструкциями. Модифицированная конструкция радиального подшипника скольжения позволила уточнить при учете дополнительного фактора сжимаемости смазочного материала – коэффициент трения – на 8...11 % в диапазоне исследованных режимов.

Ключевые слова: сжимаемость, модифицированная конструкция, ламинарный режим, оценка износостойкости, покрытие, канавка подшипника.

Введение

Для успешного развития тяжело нагруженных узлов трения транспортной и авиакосмической техники возникает необходимость использования надежной и высокопроизводительной техники путем создания новых машин и механизмов, обладающих высокой износостойкостью и другими эксплуатационными параметрами.

Процесс моделирования смазочного вещества в рабочем зазоре требует анализа многочисленных факторов, включающих реологические свойства и сжимаемость смазочного материала, режим его течения, параметры поверхности подшипника и эксплуатационные условия.

Для повышения надежности опор скольжения необходимо глубокое понимание структурных и динамических нагрузок, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. Технологические достижения в области химии и материаловедения позволили создать новые виды смазок, которые существенно уменьшают трение и износ. Это достигается путем введения в полимеры различных наполнителей, включая твердые смазки, такие как графит, дисульфид молибдена или углеродные нанотрубки [1, 2]. Такие композиты обладают значительно улучшенной износостойкостью и могут противостоять сложным воздействиям, характерным для промышленных трибосистем.

Применение жидких смазок расширяет диапазон скоростей, при которых материал может эффективно работать, поскольку это позволяет переходить от граничного трения к жидкостному трению в условиях гидродинамики [3, 4]. В момент запуска остановки будут действовать защитные покрытия, а в период стационарной работы – смазочный материал.

Одним из основных аспектов исследований является точность расчета параметров износа и взаимодействия поверхностей, что позволяет существенно повысить надежность и долговечность узлов трения [5–7]. Использование передовых компьютерных технологий и методов численного моделирования дает возможность ученым более эффективно проводить разработки в области нанотехнологий и предлагать новые виды покрытий [8], которые существенно снижают коэффициент трения и износ, увеличивая срок службы деталей.

Полимерное покрытие с канавкой на поверхности подшипника и вала [9, 10] выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, канавка способствует более равномерному распределению смазочного вещества по поверхности подшипника, что минимизирует риск образования сухого трения. Во-вторых, наличие канавки способствует более эффективному отводу тепла, что предотвращает перегрев рабочей зоны и уменьшает износ подшипника.

Проведенные трибологические испытания втулок с нанесенными металлическими покрытиями [11, 12] демонстрируют значительное снижение коэффициента трения по сравнению с обычными стальными втулками. Это подтверждает целесообразность их применения в узлах, подвергающихся интенсивным эксплуатационным нагрузкам. Применение композитов, содержащих высокопрочные волокна и армирующие элементы, позволило значительно улучшить механическую прочность и теплопроводность изделий, что важно для предотвращения перегрева и преждевременного выхода узлов из строя.

На этапе проектирования важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий [13, 14], проанализировать их поведение под воздействием высоких нагрузок, скоростей и температур.

Для успешного применения полимеров [15–17] в трибосопряжениях технологических машин необходимо учитывать специфические особенности каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к снижению

эффективности подходов, разработанных в исследованиях.

Экспериментальные данные [18–20] показали, что исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования системы «колесо – рельс» обеспечивает долговечность и надежность работы всей тормозной передачи в высоконагруженных и ответственных узлах машиностроения.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение антифрикционных полимерных композиционных покрытий открывает новые перспективы в повышении надежности и эффективности промышленного оборудования.

Гидродинамический расчет подшипников скольжения без учета сжимаемости смазочного материала является принципиально некорректным. Исследование сжимаемости смазочного материала для трибоузлов машин и механизмов представляет собой важный и актуальный аспект указанных расчетов.

Анализ работ, посвященных экспериментальному исследованию сжимаемости жидкостей в интервале температур и давления различными приемами, показывает, что предложенный новый метод способен дать надежные параметры в широком диапазоне давления и температур. Сопоставление данных о внутреннем давлении жидкости, полученных разными способами, приводит к выводу о наличии довольно большого количества ошибок в их определении. В связи с этим исследование способов повышения эксплуатационных характеристик подшипников скольжения является актуальным и востребованным.

Целью работы является оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения при учете сжимаемости микрополярного смазочного материала.

Поставленные задачи

Аналогично поставленной задаче [21] дополнительно для микрополярного смазочного материала учитывается сжимаемость.

Разработка математической модели

Для реализации поставленной цели используются общеизвестные безразмерные уравнения движения микрополярного смазочного материала для «тонкого слоя», уравнение неразрывности, а также уравнения состояния и граничных условий (рис. 1).

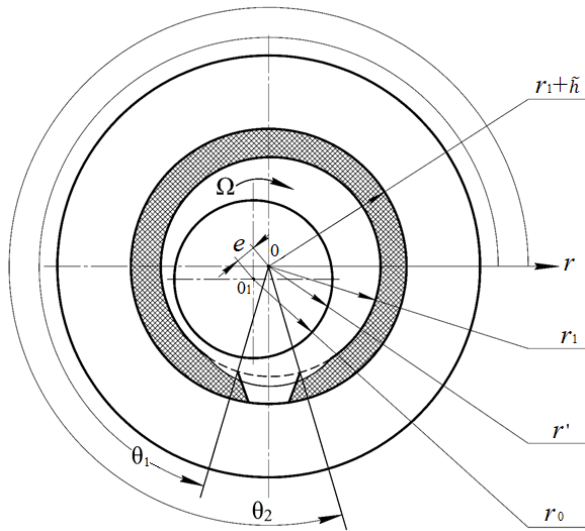


Рис. 1. Рабочая схема

Fig. 1. Working scheme

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{1}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0; \quad p = \rho,$$

где

$$\Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}; \quad p = \frac{\lambda \Omega^2 r_0^2}{2} \rho.$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при } r = \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0$$

$$\text{при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*};$$

$$Q = \text{const}; \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1).$$

Полагаем, что функции $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ определяются соотношениями

$$v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}. \quad (2)$$

Также необходимо для решения задачи записать уравнение контуров в случае, когда полюс модифицированной конструкции радиального подшипника находится в центре подшипника:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}, \quad (3)$$

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$, r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; \tilde{h} – высота канавки.

Для сжимаемого микрополярного смазочного материала пренебрегаем $\frac{1}{N_1} \ll 1$, тогда уравнение (2) преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h}(2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2h}(r^2 - rh), \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho.$$

Автомодельное решение (4) ищем по известному методу [22]:

$$\rho v_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta);$$

$$\psi_i(r, \theta) = \tilde{\psi}_i(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i);$$

$$U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) h'(\theta); \quad (5)$$

$$\xi_i = \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$\xi_i = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi.$$

В результате уравнение (4) примет вид

$$\tilde{\psi}_i''' = a_i; \quad \tilde{u}_i'' = b_i - \frac{N^2}{2}(2\xi_i - 1);$$

$$\tilde{u}_i(\xi_i) - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i p}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3;$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2 p}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}.$$

$$v_i(0) = 0; \quad \tilde{\psi}_i'(0) = 0,$$

$$\tilde{\psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta; \quad \tilde{v}_i'(1) = 0;$$

$$v_i(1) = 0; \quad \tilde{u}_i(0) = 0; \quad \tilde{v}_i(0) = 1; \quad \int_{\theta}^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i = 0; \quad (7)$$

$$p(\theta) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}.$$

Интегрируя уравнение (6) с учетом граничных условий (7) в результате получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi_i) &= a_1 \frac{\xi_i}{2} (\xi_i - 1), \\ \tilde{u}_1(\xi_i) &= b_1 \frac{\xi_i^2}{2} - \left(\frac{b_1}{2} + p\right) \xi_i + p; \\ p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda}{(1-\eta_2)^2} \times \\ &\times \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - \frac{2}{p} \cdot \frac{\sqrt{1-\tilde{\eta}^2}}{2+\tilde{\eta}^2} (\theta + 3\eta \sin \theta) \right); \\ p_2 &= \frac{p_g}{p^*} + 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \times \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\ p_3 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1-\eta_2)^2} \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения давления используем метод последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

$$\begin{aligned} p_{11} &= \frac{p_g}{p^*}, \quad p_{21} = \frac{p_g}{p^*}, \quad p_{31} = \frac{p_g}{p^*}, \\ p_{12} &= \frac{6\Lambda}{(1-\eta_2)^2} \times \\ &\times \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \cdot \frac{\sqrt{1-\tilde{\eta}^2}}{2+\tilde{\eta}^2} (\theta + 3\eta \sin \theta) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{22} &= 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \right. \\ &\left. - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \times \left(1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right) \right]; \\ p_{32} &= \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1-\eta_2)^2} \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \right. \\ &\left. - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Учитываются следующие диапазоны параметров, использованных в аналитической модели (на основании проведенных проверочных расчетов): $\Lambda = 0,1 \dots 0,9$; диаметр 20 мм; среднее рабочее давление варьируется в пределах $\sigma = 15 \dots 75$ МПа; динамическая вязкость изменяется $\mu_0 = 0,0707 \dots 0,0076$ Н·с/м², $\theta_2 - \theta_1 = 4$ мм – ширина канавки согласно исследованиям. Эти параметры были выбраны в соответствии с требованиями исследования и на основе предварительного анализа их влияния на конечные результаты, что позволяет детально изучить поведение системы в различных режимах эксплуатации.

Результаты численного анализа представлены на графике (рис. 2). График демонстрирует зависимость ключевых характеристик модели от переменных параметров.

Таким образом, проведенные расчеты и анализ моделирования подтверждают важность ранжирования параметров для достижения стабильности и надежности модели. Такие результаты являются основой для дальнейших исследований и позволяют оптимизировать систему с целью увеличения ее эффективности в различных эксплуатационных условиях.

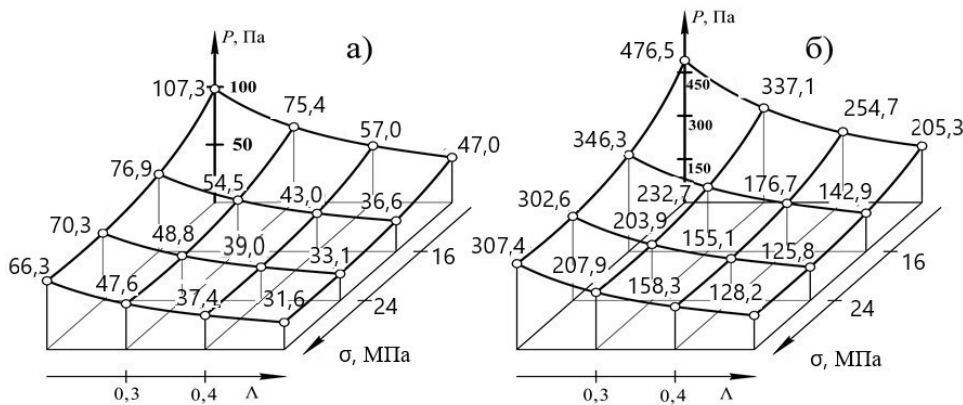


Рис. 2. Влияние сжимаемости и нагрузки на вертикальные составляющие: а – при $V = 0,3$ м/с; б – при $V = 1$ м/с

Fig. 2. The effect of compressibility and load on vertical components: а - at $V = 0.3$ m/s; б - at $V = 1$ m/s

Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование состоит из верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определения величины погрешности; комплекса экспериментального исследования подшипника с новой разработанной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки. Это несущая поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющая маслоподдерживающую канавку, а также профиль, контур которого адаптирован к конкретным условиям трения.

В процессе этих исследований установлена область их рационального применения. Исследуемые антифрикционные покрытия представляют собой гибридный композиционный материал, состоящий из трех типов полимеров различной физической природы. Это тканый каркас из фторопластовых нитей «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81) и полиимидных нитей «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), пропитанный матричным связующим на основе фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников скольжения проводились на модернизированной машине трения модели ИИ5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу 60 градусов. На их рабочие поверхности наносились полимерные композиционные покрытия

и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, колодки имеют отверстия для термопар.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных, полученных в ходе исследований, позволяет сделать вывод о значительной роли этих корректировок в повышении эффективности работы радиальных подшипников скольжения. При этом адаптация профиля опорной поверхности под реальные условия эксплуатации становится важным фактом в обеспечении стабильности работы узлов, значительно снижая риск перегрева и износа. Сжимаемость материала вносит дополнительные преимущества в надежность конструкции, уменьшая вибрационные нагрузки и способствуя более равномерному распределению давления на различные участки подшипника (табл. 1).

Несомненно, важным аспектом в этих исследованиях является уточнение коэффициента трения на 8...11 %. Это достигается за счет подбора оптимальных смазочных материалов и геометрической конфигурации, что в пределах исследуемых режимов способствует уменьшению энергетических потерь и повышению нагрузочной способности подшипника. Данные коррективы особенно ценны для высоконагруженных узлов с повышенными требованиями к долговечности и надежности.

Для подтверждения эффективности теоретических моделей проведено экспериментальное исследование влияния параметра сжимаемости на работу подшипников (табл. 2)

Таблица 1. Результаты теоретического исследования

Table 1. The results of the theoretical study

№ п/п	Нагрузка σ , МПа	Параметр сжимаемости Δ				
		0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
		Коэффициент трения				
1	15	0,006190	0,0076130	0,006500	0,0033000	0,00037000
2	30	0,002890	0,0020910	0,003053	0,0013850	0,00011150
3	45	0,088893	0,000907	0,001040	0,0000305	0,00015700
4	60	0,088595	0,0006106	0,000504	0,0005136	0,00013793
5	75	0,088497	0,0012105	0,000681	0,0005570	0,00011887

Таблица 2. Сравнительный анализ исследований коэффициента трения

Table 2. Comparative analysis of the research results of a bearing sleeve with fluoroplastic-containing

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с	Покрытие	С учетом сжимаемости	Покрытие
1	15	0,3	0,0155	0,0133	0,0134
2	30	0,3	0,098	0,0074	0,0073
3	45	0,3	0,0080	0,0052	0,0054
4	60	0,3	0,0095	0,0062	0,0063
5	75	0,3	0,0135	0,0095	0,0096

Путем применения специализированного экспериментального оборудования удалось собрать точные и важные данные о характеристиках работы подшипников скольжения.

С учетом поставленной задачи подтверждается общая стратегия проведения экспериментальных исследований в соответствии с классическими однофакторными и полнофакторными планами.

Выводы

1. Новая математическая модель, разработанная на основе проведенных исследований, позволяет с высокой точностью вычислять ключевые параметры, такие как сила трения, нагрузочная способность и гидродинамическое давление, что является критически важным для оценки износостойкости различных механизмов и машин.

2. Выполнены расчеты для проектирования втулок подшипников, учитывающие дополнительное полимерное покрытие, которое не только уменьшает трение, но и защищает металлические компоненты от износа.

3. Выполненные при исследовании модифицированных радиальных подшипников скольжения расчеты доказали, что учет сжимаемости микрополярного жидкого смазочного материала повышает точность инженерных расчетов по коэффициенту трения на 8...11 %.

Библиографические ссылки

1. Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения // *Universum: технические науки* / Г. И. Сайфуллаева [и др.]. 2020. № 12 (81) [Электронный ресурс]. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 26.04.2024).

2. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, И. В. Смирнов, П. В. Воронов, В. В. Афонин, Е. Н. Каблов, О. В. Старцев, В. О. Старцев, И. М. Медведев // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 11-5. С. 911–924 [Электронный ресурс]. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 26.04.2024).

3. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С. С. Негматов [и др.] // *Пластические массы*. 2020. № 7-8. С. 32–36.

4. *Икромов Н. А., Расулов Д. Н.* Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов // *Современные научные исследования и инновации*. 2020. № 10 [Электронный ресурс]. URL:

<https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 26.04.2024).

5. *Polyakov R., Savin L.* (2017) The method of long-life calculation for a friction couple “rotor-hybrid bearing”: Proc. of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering. Rhodes Island, 2017, June 12-14, pp. 433-440.

6. *Поляков Р. Н., Савин Л. А., Внуков А. В.* Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018. № 1 (327). С. 66–71.

7. *Polyakov R.* (2020) Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability. *Vibroengineering Procedia*, vol. 30, pp. 61-67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379

8. *Shapovalov V.V.* (2020) Improving the efficiency of the path - rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 900 (1), 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011

9. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В. В. Василенко, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 365–372.

10. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х. Н. Абдурахман, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 9–17.

11. *Хасьянова Д. У., Мукутадзе М. А.* Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 4. С. 46–53. DOI: 10.31857/S0235711922040101

12. *Хасьянова Д. У., Мукутадзе М. А.* Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023. № 3. С. 42–49.

13. *Kornaeva E.P.* (2020) Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication: *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 734, no. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/012154

14. *Shutin D.V., Polyakov R.N.* (2020) Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery: *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 862, no. 032098. DOI: 10/1088/1757-899X/862/3/032098

15. *Zinoviev V.E.* (2020) Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions: *IOP Conference Series : Materials*

Science and Engineering, vol. 900 (1), no. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009

16. Харламов П. В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1. С. 122–129.

17. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182.

18. Харламов П. В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3. С. 37–45.

19. Харламов П. В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 12. С. 556–560.

20. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 4. С. 464–474. DOI: 10.3103/S1068366620040121

21. Андреева О. Б., Киришчиева В. И., Мукутадзе М. А. Повышение износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 23–31.

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. (2022) Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 51, no. 2, pp. 128-133.

References

1. Sayfullayeva G.I. (2020) [Investigation of electrically conductive composite thermosetting polymer materials and coatings based on them for tribotechnical appointment]. *Universum: technical sciences*, 12 (81) [Electronic resource]. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (accessed: 26.04.2024) (in Russ.).

2. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N., Startsev O.V., Startsev V.O., Medvedev I.M. (2016) [Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic conditions factors of the Black Sea coast]. *Fundamental research*, no. 11-5, pp. 911-924 [Electronic resource]. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (accessed: 26.04.2024) (in Russ.).

3. Negmatov S.S. (2020) [Investigation of viscoelastic and adhesive strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for machine-building purposes]. *Plastic masses*, no. 7-8, pp. 32-36 (in Russ.).

4. Ikromov N.A., Rasulov D.N. (2020) [Objects and methods of research of composite polymer materials]. *Modern scientific research and innovations*, no. 10 [Electronic resource]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (accessed: 26.04.2024) (in Russ.).

5. Polyakov R., Savin L. (2017) The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing». Proc. of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering. Rhodes Island, 2017, June 12-14, pp. 433-440.

6. Polyakov R.N., Savin L.A., Vnukov A.V. (2018) [A mathematical model of a contactless finger seal with active gap control]. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, no. 1, pp. 66-71 (in Russ.).

7. Polyakov R. (2020) Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability. *Vibroengineering Procedia*, vol. 30, pp. 61-67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379

8. Shapovalov V.V. (2020) Improving the efficiency of the path - rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 900 (1), 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011

9. Vasilenko V.V., Kirishchieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. (2022) [Study of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove]. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, vol. 22, no. 4, pp. 365-372 (in Russ.).

10. Abdulrahman H.N., Kirishchieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. (2022) [Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the dependence of viscosity on pressure]. *Frontier Materials & Technologies*, no. 4, pp. 9-17 (in Russ.).

11. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. (2022) [Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and melts of a metal coating]. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*, no. 4, pp. 46-53 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0235711922040101

12. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. (2023) [A study on the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature]. *Problems of mechanical engineering and automation*, no. 3, pp. 42-49 (in Russ.).

13. Kornaeva E.P. (2020) [Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication]: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 734, no. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/012154

14. Shutin D.V., Polyakov R.N. (2020) Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 862, no. 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098

15. Zinoviev V.E. (2020) Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-

polymer compositions: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 900, no. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009

16. Kharlamov P.V. (2021) [Monitoring of changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems of studying tribological processes in the railway track - rolling stock system]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, no. 1, pp. 122-129 (in Russ.).

17. Shapovalov V.V. (2019) [Improving the efficiency of the friction system "wheel – rail"]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezнодорожного транспорта*, vol. 78, no. 3, pp. 177-182 (in Russ.).

18. Kharlamov P.V. (2021) [Application of a physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of a counterbody]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, no. 3, pp. 37-45 (in Russ.).

19. Kharlamov P.V. (2021) [Investigation of the formation of secondary structures of friction transfer on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology]. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni*, no. 12, pp. 556-560 (in Russ.).

20. Shapovalov V.V. (2020) [Metal plating of the friction working surfaces of the wheel - rail pair]. *Trenie i iznos*, vol. 41, no. 4, pp. 464-474 (in Russ.). DOI: 10.3103/S1068366620040121

21. Andreeva O.B., Kirishcheva V.I., Mukutadze M.A. (2022) [Increasing the wear resistance of a polymer-coated radial bearing running on a micropolar lubricant]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 25, no. 3, pp. 23-31 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-23-31

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. (2022) Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 51, no. 2, pp. 128-133.

Modified Radial Bearing Wear Resistance Assessment with Respect to Compressibility

E.A. Bolgova, Post-graduate, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

M.A. Mukutadze, DSc in Engineering, Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

V.M. Prihod'ko, DSc in Engineering, Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Polymer composite materials in the form of antifriction coatings are widely used nowadays in heavily loaded low-speed tribosystems of various machines, providing significant resources for friction units. The use of liquid lubricants makes it possible to expand the speed range of their applicability since it provides a transition from self-lubrication boundary friction to liquid friction under hydrodynamic conditions. Then, coatings will be active during starts and runouts, and lubricant will work during stationary mode. Liquid lubricant moving in the working gap inevitably contains atmospheric gases, that significantly affect the performance characteristics of a lubricant, and primarily, its compressibility. Therefore, the introduction of the compressibility parameter into the model allows a more accurate prediction of lubricant behavior and lubrication efficiency in various bearing operating modes. This study includes the development and analysis of a mathematical model of a micropolar lubricant for a polymer-coated bearing on the bearing sleeve support surface. The modified bearing design provides for a polymer coating with a groove, which improves the distribution of lubricant and increases the durability of the system. The novelty of the work lies in the methodology development for design engineering analysis of the polymer coating journal bearing with a groove, taking into account compressibility, allowing to determine the value of the main tribotechnical parameters. The aim of the work is to assess wear resistance of the modified design of journal bearing, taking into account the compressibility of the micropolar lubricant. Based on the motion equation of the liquid lubricant under study, the continuity equation and the equation of state, new mathematical models were obtained taking into account the compressibility of the lubricant. The results of the study showed that the modified design of the bearing with a polymer coating and groove significantly improved its performance. A decrease in the friction coefficient value and an increase in the bearing capacity of the bearing in comparison with conventional designs were noticed. The modified design of the journal bearing allowed clarification of friction coefficient by 8-11% within the range of the studied modes, taking into account an additional parameter – the lubricant compressibility.

Keywords: compressibility, modified structure, laminar flow, wear resistance assessment, coating, groove.

Получено 02.05.2024

Образец цитирования

Болгова Е. А., Мукутадзе М. А., Приходько В. М. Оценка износостойкости модифицированного радиального подшипника с учетом сжимаемости // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 14–21. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-14-21

For Citation

Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Prihod'ko V.M. (2024) [Modified Radial Bearing Wear Resistance Assessment with Respect to Compressibility]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 14-21 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-14-21