

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ КЛИНОВИДНОЙ ОПОРЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Научная статья

Мукутадзе М.А.^{1*}, Приходько В.М.², Шведова В.Е.³, Бадахов Г.А.⁴, Зиновьев Н.В.⁵¹ ORCID : 0000-0003-2810-3047;² ORCID : 0000-0002-0907-9320;³ ORCID : 0000-0002-8469-7671;⁵ ORCID : 0000-0001-7966-5512;^{1, 2, 3, 4, 5} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (murman1963[at]yandex.ru)

Аннотация

В тяжело нагруженных узлах трения для обеспечения высокой несущей способности и увеличения продолжительности гидродинамического режима на рабочих поверхностях подшипников скольжения применяются различного вида покрытия.

В исследовании осуществляется разработка и развитие математических моделей клиновидной опоры скольжения с нестандартным опорным профилем, адаптированным к условиям трения, и металлическим покрытием поверхности направляющей. Ключевую роль здесь играет методика аналитического прогнозирования, определяющая механизм трения.

Целью исследования является разработка математической модели клиновидной опоры скольжения с нестандартным профилем опорной поверхности ползуна и металлическим покрытием поверхности направляющей, с учетом реологических свойств смазочного материала ферромагнитными свойствами, в зависимости от давления для прогнозирования продолжительности гидродинамического режима трения.

Задачей исследования является разработка новых математических моделей и проведение анализа движения смазочного материала и расплава покрытия, обладающих ферромагнитными реологическими свойствами, в рабочем зазоре упорного подшипника скольжения с учетом конструктивных особенностей для прогнозирования срока службы трибосистемы.

Отличием предлагаемой модели от существующих моделей трибосистем с металлическим покрытием является наличие адаптированного профиля и смазочного материала, обладающего ферромагнитными реологическими свойствами и обеспечивающего снижение износа при пуске и остановке, следовательно, увеличение срока службы трибосистем.

С помощью уравнения движения ферромагнитного смазочного материала, уравнения неразрывности, уравнения, описывающего профиль расплавленного контура направляющей, получены новые математические модели, учитывающие конструктивные особенности упорного подшипника скольжения.

Экспериментально подтверждена эффективность полученных теоретических расчетных моделей.

В результате исследования разработаны новые математические модели для инженерных расчетов, позволяющие прогнозировать эффективность, надежность и продолжительность гидродинамического режима смазывания, а также определить основные триботехнические параметры.

Ключевые слова: ферромагнитный смазочный материал, опора скольжения, нестандартный опорный профиль, металлическое покрытие, гидродинамический режим, расплав покрытия.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF FERROMAGNETIC LUBRICANT FLOW IN A HIGHLY LOADED WEDGE-SHAPED SLIDING SUPPORT

Research article

Mukutadze M.A.^{1*}, Prikhodko V.M.², Shvedova V.Y.³, Badakhov G.A.⁴, Zinovev N.V.⁵¹ ORCID : 0000-0003-2810-3047;² ORCID : 0000-0002-0907-9320;³ ORCID : 0000-0002-8469-7671;⁵ ORCID : 0000-0001-7966-5512;^{1, 2, 3, 4, 5} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (murman1963[at]yandex.ru)

Abstract

In heavy-loaded friction units for maintenance of high bearing capacity and increase of duration of hydrodynamic mode on working surfaces of sliding bearings, various kinds of coatings are applied.

The research design and development of mathematical models of a wedge-shaped sliding bearing with a non-standard bearing profile adapted to friction conditions and a metallic coating of the guide surface is carried out. The key role here is played by the analytical prediction methodology determining the friction mechanism.

The aim of the study is to develop a mathematical model of wedge-shaped sliding bearing with a non-standard profile of the slider bearing surface and metal coating of the guide surface, taking into account the rheological properties of the ferromagnetic lubricant, depending on the pressure to predict the duration of the hydrodynamic regime of friction.

The task of the study is to develop new mathematical models and analyse the motion of lubricant and melt coating, possessing ferromagnetic rheological properties, in the working gap of the thrust plain bearing with regard to design features to predict the service life of the tribosystem.

The difference of the proposed model from the existing models of metal-coated tribosystems is the presence of an adapted profile and lubricant having ferromagnetic rheological properties and providing reduced wear during start-up and stopping, hence, increased life of tribosystems.

Using the equation of motion of ferromagnetic lubricant, the equation of continuity, the equation describing the profile of the molten contour of the guide, new mathematical models that take into account the design features of the thrust sliding bearing have been derived.

The efficiency of the obtained theoretical computational models was experimentally confirmed.

As a result of the study, new mathematical models for engineering calculations were developed to predict the efficiency, reliability and duration of the hydrodynamic lubrication regime, as well as to determine the main tribotechnical parameters.

Keywords: ferromagnetic lubricant, sliding support, non-standard support profile, metal coating, hydrodynamic mode, melt coating.

Введение

В современных условиях математическое моделирование работы трибоузлов и ее прогнозирование при применении антифрикционных покрытий, применение смазки с расплавом с учетом реологических свойств смазки является значимой задачей эффективного поддержания должного уровня готовности высокотехнологической продукции длительных процессов эксплуатации.

Анализ работ [1], [2], [3], [4] показывает, что при проектировании узлов трения необходимо развивать и совершенствовать методологию моделирования подшипниковых узлов. В работах [5], [6], [7], [8] приводятся исследования влияния на процесс трения антифрикционных покрытий контактирующих поверхностей.

Авторы научных статей [9], [10], [11], [12] применяют технологии металлоплакирования для уменьшения силы трения. Установлено, что на прямых отрезках пути снижается износ рабочей поверхности колес, а мощность тяги повышается.

Работы [14], [15], [16], [17] и др. посвящены испытаниям на износостойкость контактирующих деталей в трибосистемах.

В работах [22], [23], [24], [25] проведены исследования трибосистем упорных и радиальных подшипников, позволяющие увеличить на 10–12 % их гидродинамический режим работы.

В научных статьях [18], [19], [20], [21] и др. проанализирована работа трибосистем, что позволило сделать вывод о необходимости применения новых смазочных материалов, конструктивных изменений и совершенствования математических моделей трибосистемы «пятник – подпятник», работающей в экстремальных условиях.

Задачи исследования

Рассматривается установившееся течение несжимаемой смазки и смазки с расплавом, имеющих ферромагнитные свойства при работе опоры скольжения «пятник – подпятник». Исследуемая система – клиновидная опора – состоит из ползуна (пятник), нестандартный контур которого наклонен к направляющей (подпятник) под углом α . Направляющая перемещается с заданной скоростью u в сторону сужения зазора (рис. 1). Решение проведено в декартовой системе координат.

Уравнения контуров поверхностей пятника и подпятника:

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha^* = h_1(x'), \quad y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha^* - a' \sin \omega' x' = h(x'), \quad y' = -\lambda' f'(x') \quad (1)$$

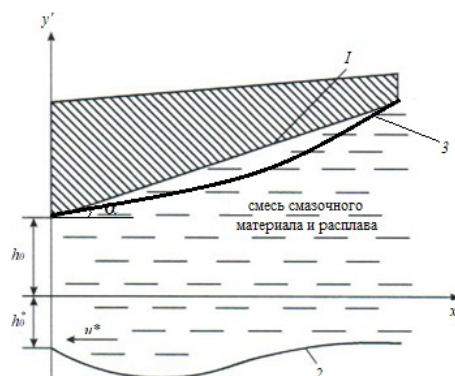


Рисунок 1 - Схематическое изображение упорного подшипника

Примечание: 1 – контур пятника; 2 – контур подпятника; 3 – нестандартный контур пятника

Запишем соотношение вязкости ферромагнитной смазки от давления

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}; \quad \sigma' = \sigma_0 e^{\alpha' p'} \quad (2)$$

В решении задачи исходим из безразмерных переменных системы уравнений движения ферромагнитной смазки с учетом (2) для случая «тонкого слоя», уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx} + Nv - A; \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad \frac{d\Phi(x)}{dx} = -Ke^{-\alpha p} \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2 dy \quad (3)$$

Для поставленной задачи (3) принимаем граничные условия:

$$\begin{aligned} v = 0, u = 0 \text{ при } y = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x = h(x); \\ v = -1, u = 0 \text{ при } y = -\Phi(x); \\ p(0) = p(1) = \frac{pa}{p^*}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\eta = \frac{L \operatorname{tg} \alpha}{h_0}, \eta_1 = \frac{a'}{h_0}, \Phi(x) = -\lambda' f'(x') = -\frac{h_0^*}{L}, K = \frac{2\mu_0 u^* L}{h_0^2 L'}$.

Дальнейшие решения поставленной задачи проведем в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} x' = Lx, y' = h_0 y, v_{x''} = u^* v, v_{y'} = u^* \frac{h_0}{L} u, p' = p^* \cdot p, \\ \mu' = \mu_0 \mu, \quad \sigma' = \sigma_0 \sigma, \quad \omega' = \omega L, p^* = \frac{\mu_0 u^* L}{h_0^2}, \alpha' = \frac{\alpha}{p^*} \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем асимптотическое решение задачи (3):

$$\begin{aligned} v(x, y) = v_0(x, y) + K v_1(x, y) + K^2 v_2(x, y) + \dots; \\ u(x, y) = u_0(x, y) + K u_1(x, y) + K^2 u_2(x, y) + \dots; \\ \Phi(x) = \Phi_0(x) - K \Phi_1(x) - K^2 \Phi_2(x) - K^3 \Phi_3(x) - \dots; \\ z(x) = z_0(x) + K z_1(x) + K^2 z_2(x) + K^3 z_3(x) \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Дальше, найдем нулевое приближение решения поставленной задачи, подставив (6) в (3) и применив (4):
– нулевое приближение:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_0}{dx} - N - A, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$v_0 = 0, u_0 = 0 \text{ при } y = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x; \quad (8)$$

$$v_0 = -1, u_0 = 0 \text{ при } y = -\Phi(x); z(0) = z(1) = e^{-\frac{pa}{p^*}};$$

– первое приближение:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_1}{dx}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0; -z_0 \frac{d\Phi_1(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)^2 dy; \quad (9)$$

$$v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \quad (10)$$

$$v_1 = 0, \quad u_1 = 0 \text{ при } y = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x; z_1(0) = z_1(1) = 1; \quad \Phi_1(0) = h_0^*.$$

Найдем автомодельное решение задачи нулевого приближения по методу [26], [27]:

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

$$z_0 = -6\alpha(1 + 3(N + A)) \left(x^2 - x + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1 - (\cos \omega - 1)x) \right) + e^{-\alpha \frac{pa}{p^*}}.$$

Учитывая (11), получим выражение для $\Phi(x)$:

$$\Phi_1(x) = \frac{1}{\sup_{x \in [0;1]} z_0} \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 - \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega x + h_0^* \right). \quad (12)$$

Проведем преобразования (9) – (10) аналогично решению (7):

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi) &= \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(1 - \frac{\tilde{C}_1}{2}\right) \xi - 1, \quad \tilde{C}_1 = 6M. \\ z_1 &= \frac{-6M\alpha}{(1 + \tilde{\Phi})^2} \left(\frac{\tilde{\eta}}{2} (x^2 - x) - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega x - 1 - (\cos \omega - 1)x) \right) + 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая (11) и (13), принимая $z = z_0 + kz_1$, найдем:

$$p = \frac{p_a}{p^*} - 6(A + KMB) \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right). \quad (14)$$

Учитывая (7), (9) и (14), в решении поставленной задачи получим зависимости аналитические выражения для W , $L_{\text{тр}}$:

$$\begin{aligned} W &= p^* L \int_0^1 \left(p - \frac{p_a}{p^*} \right) dx = \frac{3\mu_0 u^* L^2}{h_0^2} \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) (1 + 3(N + A)) \times \\ &\times \left(\frac{1}{6} - \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin \omega}{\omega} - 1 - \frac{1}{2} (\cos \omega - 1) \right) \right) + \frac{KM}{(1 + \tilde{\Phi})^2} \left(\frac{1}{6} - \frac{\tilde{\eta}}{\omega} \left(\frac{\sin \omega}{\omega} - 1 - \frac{1}{2} (\cos \omega - 1) \right) \right). \\ L_{\text{тр}} &= \mu \int_0^1 \left[\left. \frac{\partial v_0}{\partial y} \right|_{y=0} + K \left. \frac{\partial v_1}{\partial y} \right|_{y=0} \right] dx = \mu_0 \left(1 - \frac{\eta}{2} - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) + (N + A) \left(\frac{\eta}{4} + \frac{1}{2} - \frac{\eta_1}{2\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right) + \\ &+ K \left(1 - \eta - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) + (N + A) \left(\frac{1}{2} - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right) \left(1 - \alpha p + \frac{1}{2} \alpha^2 p^2 \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Анализ полученной математической модели

Проведены проверочные расчеты полученных аналитических зависимостей основных рабочих характеристик исследуемой опоры скольжения с использованием параметров в следующих диапазонах их численных значений: $h_0 = 10^{-7}$ м; $L = 0,1256 \dots 0,1884$ м; $p_a = 0,08 \dots 0,101325$ МПа; $\alpha = 0 \dots 1$; $p = 0,5 \dots 16$ МПа; $L' = 49,855 \dots 52,657$ кН/м² (применен слой баббита марок Б83, Б88); $\mu_0 = 0,197 \dots 0,09501$ Нс/м² (применена смазка ЛЗ ЦНИИ).

Проведено сравнение величин коэффициентов трения предложенной опоры скольжения «пятник – подпятник» при скорости скольжения 1 м/с и изменяющейся нагрузке равной 6...30 МПа. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение величин коэффициента трения

№ п/п	Нагрузка	«Пятник – подпятник»		
	σ , МПа	Поверхности трения стандартные	Баббитовое покрытие	Баббитовое покрытие и нестандартный опорный профиль
1	6	0,0220	0,0185	0,0172
2	12	0,0165	0,0138	0,0165
3	18	0,0245	0,0110	0,00900
4	24	0,0260	0,0125	0,0101
5	30	0,0300	0,0165	0,01125

Экспериментальная проверка расчетных соотношений

Верификация разработанных математических моделей проводилась лабораторно для испытания упорных подшипников на настольно-сверлильном станке (НС-12) на образцах из плоской опоры и сопряженного с ней контртела, имеющего рабочую поверхность, выполненную по специальному некруговому контуру. Покрытие поверхности плоской опоры представляло собой баббит. Результаты экспериментального исследования коэффициента трения при скорости скольжения 1 м/с и нагрузке $\sigma = 6 \dots 30$ МПа сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Сравнение величин коэффициента трения (экспериментальная проверка)

№ п/п	Нагрузка	«Пятник – подпятник»		
	σ , МПа	Поверхности трения стандартные	Баббитовое покрытие	Баббитовое покрытие и нестандартный опорный профиль

1	6	0,0615	0,0185	0,010
2	12	0,0458	0,0128	0,0119
3	18	0,0440	0,002	0,00801
4	24	0,0455	0,0125	0,0102
5	30	0,0495	0,0166	0,0134

Исследуемые конструкции подшипников скольжения, работающие в гидродинамическом режиме смазывания и компенсирующие, на определенный срок, отсутствие штатного смазочного материала, имеют металлические покрытия, расплав которых выполняет все функции смазочного материала и обеспечивает режим гидродинамического смазывания. Также дополнительно применялся адаптированный к условиям трения опорный профиль контактной поверхности, облегчающий выход подшипника на гидродинамический режим.

Схема экспериментальных исследований включала следующие этапы:

- 1) работа в режиме гидродинамического смазывания;
- 2) прекращение подачи жидкого смазочного материала смазывания;
- 3) работа до полного расхода расплава или разрушения легкоплавкого покрытия.

При этом на компьютере постоянно фиксировалась величина коэффициента трения f , а предварительно устанавливалась несущая способность подшипника.

Наличие пленки жидкого смазочного материала имело место только на первом, начальном, этапе при смазывании маслом. Затем на втором, конечном, этапе подача смазочного материала прекращалась, и с ростом температуры подшипник смазывался металлическим расплавом. Гидродинамический режим смазывания сохранялся постоянно.

Заключение

1. В процессе проведенных исследований разработаны математические модели (7), (9), (14), (15) упорного подшипника «пятник – подпятник» с нестандартным профилем опорной поверхности ползуна (пятника) и баббитовым покрытием поверхности направляющей (подпятника) с применением реологических свойств смазочного материала и расплава покрытия направляющей, обладающих ферромагнитными свойствами;

2. Проведено теоретическое исследование и экспериментальное моделирование упорных подшипников с поверхностью трения: стандартной; с баббитовым покрытием; с нестандартным профилем опорной поверхности и баббитовым покрытием направляющей;

3. Определены основные рабочие характеристики упорного подшипника для несущей способности и силы трения. Численный анализ полученных аналитических выражений и экспериментальных данных для модифицированной трибосистемы показывает возрастание нагрузочной способности и снижение коэффициента трения;

4. Полученные в результате исследования новые математические модели позволяют в процессе инженерных расчетов прогнозировать эффективность, надежность и продолжительность гидродинамического режима смазывания, а также определять основные триботехнические параметры.

Обозначения:

α – угол наклона ползуна к оси Ox ; h_0 – начальный зазор слоя смазки; h_0^* – толщина баббитового покрытия; $\Phi(x)$ – функция, определяющая контур расплавленной поверхности направляющей; K – обобщенный параметр, характеризующий смазку с расплавом; L' – удельная теплота плавления на единицу объема; N – число Гартмана; A – величина, обусловленная наличием электромагнитного поля; W – несущая способность; $L_{тр}$ – сила трения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории кафедры Теоретической механики ФГБОУ ВО РГУПС академику Российской академии наук Колесникову В.И. за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Нестеренко Г.А., Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

Acknowledgement

The authors express their gratitude to V.I. Kolesnikov, head of the laboratory of the Department of Theoretical Mechanics of FSFEI HE RSTU, academician of the Russian Academy of Sciences, for his help in conducting experimental studies.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Nesterenko G.A., Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Список литературы / References

1. Polyakov R. The Method of Long-Life Calculation for a Friction Couple “Rotor – Hybrid Bearing” / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017. — Rhodes Island: International Center for Numerical Methods in Engineering, 2017. — P. 433-440.

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

3. Polyakov R. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavtsev et al. // Vibroengineering Procedia. — 2020. — Vol. 30. — P. 61-67. — DOI: 10.21595/vp.2020.21379.

4. Kornaeva E.P. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E.P. Kornaeva, A.V. Kornaev, Yu.N. Kazakov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 734. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
5. Shutin D.V. Active Hybrid Bearings as Mean for Improving Stability and Diagnostics of Heavy Rotors of Power Generating Machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862. — DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
6. Zinoviev V.E. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions / V.E. Zinoviev, P.V. Kharlamov, N.V. Zinoviev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
7. Харламов П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 1(81). — С. 122-129. — DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122.
8. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 3(83). — С. 37-45. — DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_37.
9. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования / П.В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2021. — № 12. — С. 556-560. — DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
10. Шаповалов В.В. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В.В. Шаповалов, Ю.Ф. Мигаль, А.Л. Озябкин и др. // Трение и износ. — 2020. — Т. 41. — № 4. — С. 464-474. — DOI: 10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474.
11. Шаповалов В.В. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В.В. Шаповалов, П.Н. Щербак, В.М. Богданов и др. // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2019. — Т. 78. — № 3. — С. 177-182. — DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182.
12. Shapovalov V.V. Improving the Efficiency of the Path-Rolling Stock System Based on the Implementation of Anisotropic Frictional Bonds / V.V. Shapovalov, V.I. Kolesnikov, P.V. Kharlamov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
13. Krishna U.G. Processing and Microstructural Characterization of Cermet-Reinforced Aluminium Matrix Composite by Solidification Process / U.G. Krishna, V. Auradi, B. Vasudeva et al. // Transactions of the Indian Institute of Metals. — 2018. — Vol. 71(11). — P. 2851-2854. — DOI: 10.1007/s12666-018-1432-7.
14. Selvam P.T. Experimental Investigation on the Frictional Wear Behaviour of TiAlN Coated Brake Pads / P.T. Selvam, R. Pugazhenth, C. Dhanasekaran et al. // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 37. — P. 2419-2426. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.272.
15. Lakshmikantha R.G. Processing and Evaluation of Al/B4C Particulate MMC's: Tensile Strength and Wear Properties under Different Elevated Temperature Test Condition / R.G. Lakshmikantha, V. Auradi // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 28. — P. 504-509. — DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.209.
16. Anbuechziyan G. Influence of Microstructure and Mechanical Properties of TiC Reinforced Magnesium Nano Composites / G. Anbuechziyan, B. Mohan, S. Kathiresan et al. // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 27. — P. 1530-1534. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.176.
17. Qian C. Effect of WC Grain Size on Mechanical Properties and Microstructures of Alloy with Medium Entropy alloy Co- Ni-Fe binder / C. Qian, K. Li, X.Y. Guo et al. // Journal of Central South University. — 2020. — Vol. 27. — P. 1146-1157. — DOI: 10.1007/s11771-020-4355-5.
18. Nagaral M. Investigations on Mechanical and Wear Behaviour of Nano Al₂O₃ Particulates Reinforced AA7475 Alloy Composites / M. Nagaral, V. Auradi, S.A. Kori et al. // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. — 2019. — Vol. 13(1). — P. 4623-4635. — DOI: 10.15282/jmes.13.1.2019.19.0389.
19. Atla S. Investigation of Graphite Effect on the Mechanical and Tribological Properties of al 7075-SiC-Graphite Hybrid Metal Matrix Composites / S. Atla, K. Prasanna Lakshmi // Tribologia: Finnish Journal of Tribology. — 2020. — Vol. 37. — P. 26-32. — DOI: 10.30678/fjt.82667.
20. Rajeshkumar L. Optimization of Wear Behaviour for AA2219-MoS₂ Metal Matrix Composites in Dry and Lubricated Condition / L. Rajeshkumar, A. Saravanakumar, V. Bhuvanewari et al. // Materials Today: Proceedings. — 2020. — Vol. 27. — P. 2645-2649. — DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.087.
21. Kolesnikov I.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply / I.V. Kolesnikov, A.M. Mukutadze, V.V. Avilov // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering: ICIE 2018. — Springer, 2018. — P. 1049-1062. — DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_110.
22. Мукутадзе М.А. Радиальный подшипник скольжения с податливой опорной поверхностью / М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, А.Н. Гармоница и др. // Вестник машиностроения. — 2017. — № 12. — С. 33-38.
23. Гармоница А.Н. Расчетная модель радиального подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности вала, работающего на электропроводящем смазочном материале / А.Н. Гармоница, М.А. Мукутадзе, В.М. Приходько // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 3(46). — С. 49.
24. Мукутадзе М.А. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей / М.А. Мукутадзе, А.Н. Гармоница, В.М. Приходько // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17. — № 3(90). — С. 70-77. — DOI: 10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77.
25. Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет упорного подшипника с нежесткой опорной поверхностью / М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, А.Н. Гармоница и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 1(65). — С. 128-137.

26. Бадахов Г.А. Разработка методики повышения износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала при учете реологических свойств смазочного материала / Г.А. Бадахов, В.Н. Багрова, А.В. Морозова и др. // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2022. — № 12(126). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.54.

27. Куманин С. В. Расчетная модель ферромагнитного смазочного материала в клиновидной опоре скольжения с нестандартной поверхностью / С.В. Куманин, К.С. Ахвердиев // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2023. — № 2(128). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.35.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Polyakov R. The Method of Long-Life Calculation for a Friction Couple “Rotor – Hybrid Bearing” / R. Polyakov, L. Savin // *Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017*. — Rhodes Island: International Center for Numerical Methods in Engineering, 2017. — P. 433-440.

2. Poljakov R.N. Matematicheskaja model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotnenija s aktivnym upravleniem zazorom [A Mathematical Model of a Non-Contact Finger Seal with Active Gap Control] / R.N. Poljakov, L.A. Savin, A.V. Vnukov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]*. — 2018. — № 1(327). — P. 66-71. [in Russian]

3. Polyakov R. Predictive Analysis of Rotor Machines Fluid-Film Bearings Operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavtsev et al. // *Vibroengineering Procedia*. — 2020. — Vol. 30. — P. 61-67. — DOI: 10.21595/vp.2020.21379.

4. Kornaeva E.P. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E.P. Kornaeva, A.V. Kornaev, Yu.N. Kazakov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 734. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154.

5. Shutin D.V. Active Hybrid Bearings as Mean for Improving Stability and Diagnostics of Heavy Rotors of Power Generating Machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 862. — DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098.

6. Zinoviev V.E. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions / V.E. Zinoviev, P.V. Kharlamov, N.V. Zinoviev et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 900. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

7. Harlamov P.V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnyh karakteristik dlja reshenija zadach po issledovaniju tribologicheskikh processov v sisteme «zhelezodorozhnyj put' – podvizhnoj sostav» [Monitoring of Changes in Elastic-Dissipative Characteristics to Solve Problems of Investigation of Tribological Processes in the System "Railway Track – Rolling Stock"] / P.V. Harlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State University of Transport]*. — 2021. — № 1(81). — P. 122-129. — DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122. [in Russian]

8. Harlamov P.V. Primenenie fiziko-himicheskogo podhoda dlja izuchenija mehanizma obrazovanija vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosa na poverhnosti kontrtela [Application of Physicochemical Approach to Study the Mechanism of Formation of Secondary Structures of Frictional Transfer on the Counterbody Surface] / P.V. Harlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State Transport University]*. — 2021. — № 3(83). — P. 37-45. — DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_37. [in Russian]

9. Harlamov P.V. Issledovanie obrazovanija vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosa na poverhnosti stal'nyh obrazcov pri realizacii tehnologii metalloplakirovanija [A Study of Formation of Secondary Structures of Frictional Transfer on the Surface of Steel Samples at Realization of Metal Cladding Technology] / P.V. Harlamov // *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in Mechanical and Instrumentation Engineering]*. — 2021. — № 12. — P. 556-560. — DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560. [in Russian]

10. Shapovalov V.V. Metalloplakirovanie rabochih poverhnostej trenija pary «koleso – rel's» [Metal Plating of Working Friction Surfaces of Wheel-Rail Pair] / V.V. Shapovalov, Ju.F. Migal', A.L. Ozjabkin et al. // *Trenie i iznos [Friction and Wear]*. — 2020. — Vol. 41. — № 4. — P. 464-474. — DOI: 10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474. [in Russian]

11. Shapovalov V.V. Povyshenie jeffektivnosti frikcionnoj sistemy «koleso – rel's» [Improving the Efficiency of Wheel-Rail Friction System] / V.V. Shapovalov, P.N. Shherbak, V.M. Bogdanov et al. // *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezodorozhnogo transporta [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]*. — 2019. — Vol. 78. — № 3. — P. 177-182. — DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182. [in Russian]

12. Shapovalov V.V. Improving the Efficiency of the Path-Rolling Stock System Based on the Implementation of Anisotropic Frictional Bonds / V.V. Shapovalov, V.I. Kolesnikov, P.V. Kharlamov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 900. — DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011.

13. Krishna U.G. Processing and Microstructural Characterization of Cermet-Reinforced Aluminium Matrix Composite by Solidification Process / U.G. Krishna, V. Auradi, B. Vasudeva et al. // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. — 2018. — Vol. 71(11). — P. 2851-2854. — DOI: 10.1007/s12666-018-1432-7.

14. Selvam P.T. Experimental Investigation on the Frictional Wear Behaviour of TiAlN Coated Brake Pads / P.T. Selvam, R. Pugazhenthii, C. Dhanasekaran et al. // *Materials Today: Proceedings*. — 2020. — Vol. 37. — P. 2419-2426. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.272.

15. Lakshmikantha R.G. Processing and Evaluation of Al/B4C Particulate MMC's: Tensile Strength and Wear Properties under Different Elevated Temperature Test Condition / R.G. Lakshmikantha, V. Auradi // *Materials Today: Proceedings*. — 2020. — Vol. 28. — P. 504-509. — DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.209.

16. Anbucheziyan G. Influence of Microstructure and Mechanical Properties of TiC Reinforced Magnesium Nano Composites / G. Anbucheziyan, B. Mohan, S. Kathiresan et al. // *Materials Today: Proceedings*. — 2020. — Vol. 27. — P. 1530-1534. — DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.176.

17. Qian C. Effect of WC Grain Size on Mechanical Properties and Microstructures of Alloy with Medium Entropy alloy Co-Ni-Fe binder / C. Qian, K. Li, X.Y. Guo et al. // *Journal of Central South University*. — 2020. — Vol. 27. — P. 1146-1157. — DOI: 10.1007/s11771-020-4355-5.

18. Nagara M. Investigations on Mechanical and Wear Behaviour of Nano Al₂O₃ Particulates Reinforced AA7475 Alloy Composites / M. Nagara, V. Auradi, S.A. Kori et al. // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. — 2019. — Vol. 13(1). — P. 4623-4635. — DOI: 10.15282/jmes.13.1.2019.19.0389.
19. Atla S. Investigation of Graphite Effect on the Mechanical and Tribological Properties of al 7075-SiC-Graphite Hybrid Metal Matrix Composites / S. Atla, K. Prasanna Lakshmi // *Tribologia: Finnish Journal of Tribology*. — 2020. — Vol. 37. — P. 26-32. — DOI: 10.30678/fjt.82667.
20. Rajeshkumar L. Optimization of Wear Behaviour for AA2219-MoS₂ Metal Matrix Composites in Dry and Lubricated Condition / L. Rajeshkumar, A. Saravanakumar, V. Bhuvanewari et al. // *Materials Today: Proceedings*. — 2020. — Vol. 27. — P. 2645-2649. — DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.087.
21. Kolesnikov I.V. Ways of Increasing Wear Resistance and Damping Properties of Radial Bearings with Forced Lubricant Supply / I.V. Kolesnikov, A.M. Mukutadze, V.V. Avilov // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering: ICIE 2018*. — Springer, 2018. — P. 1049-1062. — DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_110.
22. Mukutadze M.A. Radial'nyj podshipnik skol'zhenija s podatljivoj opornoj poverhnost'ju [Radial Plain Bearing with Pliable Support Surface] / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova, A.N. Garmonina et al. // *Vestnik mashinostroenija [Engineering Bulletin]*. — 2017. — № 12. — P. 33-38. [in Russian]
23. Garmonina A.N. Raschetnaja model' radial'nogo podshipnika s dvuhslojnym poristym pokrytiem na poverhnosti vala, rabotajushhego na jelektroprovodjashhem smazochnom materiale [A Calculation Model of a Radial Bearing with Two-Layer Porous Coating on the Shaft Surface Operating on Electrically Conductive Lubricant] / A.N. Garmonina, M.A. Mukutadze, V.M. Prihod'ko // *Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]*. — 2017. — № 3(46). — P. 49. [in Russian]
24. Mukutadze M.A. Raschetnaja model' upornogo podshipnika s poristym pokrytiem na poverhnosti napravljajushhej [A Calculation Model of Thrust Bearing with Porous Coating on the Guide Surface] / M.A. Mukutadze, A.N. Garmonina, V.M. Prihod'ko // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]*. — 2017. — Vol. 17. — № 3(90). — P. 70-77. — DOI: 10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77. [in Russian]
25. Mukutadze M.A. Gidrodinamicheskij raschet upornogo podshipnika s nezhestkoj opornoj poverhnost'ju [Hydrodynamic Calculation of Thrust Bearing with Non-Rigid Support Surface] / M.A. Mukutadze, E.O. Lagunova, A.N. Garmonina et al. // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of Rostov State Transport University]*. — 2017. — № 1(65). — P. 128-137. [in Russian]
26. Badahov G.A. Razrabotka metodiki povyšhenija iznosostojkosti radial'nogo podshipnika c nestandartnym opornym profilom i polimernym pokrytiem na poverhnosti vala pri uchete reologičeskikh svojstv smazochnogo materiala [Development of a Methodology for Increasing Wear Resistance of a Radial Bearing with a Non-Standard Support Profile and Polymer Coating on the Shaft Surface by Taking into Account the Rheological Properties of the Lubricating Material] / G.A. Badahov, V.N. Bagrova, A.V. Morozova et al. // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*. — 2022. — № 12(126). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.54. [in Russian]
27. Kumanin S.V. Raschetnaja model' ferromagnitnogo smazochnogo materiala v klinovidnoj opore skol'zhenija s nestandartnoj poverhnost'ju [A Calculation Model of Ferromagnetic Lubricant in a Wedge-shaped Sliding Support with a Non-Standard Surface] / S.V. Kumanin, K.S. Ahverdiev // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*. — 2023. — № 2(128). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.35. [in Russian]