МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762 https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24

CC BY 4.0

Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения

А.О. Горленко¹, Е. В. Агеев² Д, М.Ю. Шевцов¹

¹ Брянский государственный университет бул. 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

⊠ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью представляемой работы являлась оценка различных факторов, влияющих на процесс изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, которая позволит смоделировать их контактное взаимодействие с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Методы. Моделирование процесса контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей выполнено при рассмотрении скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей, представляемого в виде контакта гладкой упругой втулки и вала с приведенными (эквивалентными) значениями параметров шероховатости. При моделировании учитываются упругие деформации сопряженных тел, а также упругопластические деформации микронеровностей. При моделировании геометрического контакта рассматри-вается некоторый участок цилиндрической поверхности, расположенный вдоль образующей в сечении цилиндра плоскостью, проходящей через его ось. Данный участок цилиндрической поверхности рассматривается как элементарная площадка общей геометрической площади контакта цилиндрических поверхностей и представляет собой участок цилиндрической поверхности, ширина которого определяется длиной большей оси эллипса в основании эллиптического параболоида при моделировании шероховатой поверхности.

Результаты. На основе моделирования контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей установлены основные факторы, влияющие на процесс их изнашивания, такие как: фактическая площадь контакта; величина сближения контактирующих поверхностей; фактическое давление; интенсивность изнашивания сопрягаемых цилиндрических поверхностей. Предложена кинетическая модель изнашивания, учитывающая параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Заключение. На основе предложенной модели изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, учитывающей параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, стало возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

© Горленко А.О., Агеев Е. В., Шевцов М. Ю., 2024

Ключевые слова: контактное взаимодействие; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; износостойкость; модель изнашивания.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Горленко А.О., Агеев Е. В., Шевцов М. Ю. Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 10-24. https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24.

Поступила в редакцию 18.06.2024

Подписана в печать 23.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Evaluation of the parameters of contact interaction and wear of parts with cylindrical friction surfaces

Alexandr O. Gorlenko¹, Evgeny V. Ageev² Z, Mikhail Yu. Shevtsov¹

¹ Bryansk State Technical University
 50 Let Oktyabrya ave. 7, Bryansk 241035, Russian Federation

² Southwest State University 50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

⊠ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

The purpose of the presented research work was to evaluate various factors affecting the wear process of parts with cylindrical friction surfaces, which will allow to simulate their contact interaction taking into account the parameters of roughness and physico-mechanical properties of the surface layer.

Methods. Modeling of the process of contact interaction of cylindrical surfaces is performed by considering the sliding contact of two cylindrical surfaces, represented as the contact of a smooth elastic sleeve and a shaft with the given (equivalent) values of roughness parameters. The modeling takes into account elastic deformations of conjugate bodies, as well as elastic-plastic deformations of micro-dimensions. When modeling a geometric contact, a certain section of the cylindrical surface is considered, located along the plane forming in the section of the cylinder passing through its axis. This section of the cylindrical surface is considered is considered as an elementary area of the total geometric contact area of cylindrical surfaces and is a section of a cylindrical surface, the width of which is determined by the length of the larger axis of the ellipse at the base of the elliptical paraboloid when modeling a rough surface.

Results. Based on the modeling of the contact interaction of cylindrical surfaces, the main factors influencing the process of their wear are established, such as: the actual contact area; the amount of convergence of the contacting surfaces; the actual pressure; the intensity of wear of the mating cylindrical surfaces. A kinetic wear model is proposed that takes into account the parameters of the roughness and physico-mechanical properties of the surface layer.

Conclusion. Based on the proposed model of wear of parts with cylindrical friction surfaces, taking into account the parameters of roughness and physico-mechanical properties of the surface layer, it became possible to provide the required intensity of wear of cylindrical friction surfaces.

Keywords: contact interaction; surface layer quality; friction; wear; wear resistance; wear model.

12

Машиностроение и машиноведение / Mechanical engineering and machine science

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the

For citation: Gorlenko A. O., Ageev E. V., Shevtsov M. Yu. Evaluation of the parameters of contact interaction and wear of parts with cylindrical friction surfaces. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2024; 28(3): 10-24 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24.

Received 18.06.2024

Accepted 23.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

В настоящее время основные теории трения и изнашивания охватывают в основном только молекулярные (адгезионные) и механические (деформационные) составляющие процесса и не учитывают параметры качества обработки сопряженных поверхностей трения [1-5].

Подавляющее большинство моделей контактного взаимодействия разработано трибологами в большей степени для номинально плоских поверхностей и в меньшей степени ими изучен контакт цилиндрических поверхностей. Недостатком известных методик расчета является то, что параметры качества поверхностного слоя учитываются не в полной мере, а контакт цилиндрических сводится к контакту номинально плоских поверхностей. В то же время, на сегодняшний день остается не изученным подход, позволяющий моделировать контакт цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя [6-10].

Для устранения имеющего место пробела для контакта цилиндрических поверхностей трения типа «вал – втулка» предлагается модель контактного взаимодействия, рассматривающая фактическую площадь контакта цилиндрических поверхностей трения с учетом физико-механических свойств поверхностного слоя.

Целью настоящей работы являлось изучение подхода к оценке параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, позволяющего моделировать контакт цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Материалы и методы

Моделирование процесса контактного взаимодействия контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения рассмотрено на примере скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей, представляемого в виде контакта гладкой упругой втулки и вала с приведенными (эквивалентными) значениями параметров шероховатости. При этом учитываются упругие деформации сопряженных тел, а также упругопластические деформации микронеровностей.

При моделировании геометрического контакта рассматривается некоторый участок цилиндрической поверхности, расположенный вдоль образующей в сечении цилиндра плоскостью, проходящей через его ось. Данная элементарная площадка является лишь не-

которой частью общей геометрической площади контакта цилиндрических поверхностей и представляет собой участок цилиндрической поверхности, ширина которого определяется длиной большей оси эллипса в основании эллиптического параболоида при моделировании шероховатой поверхности [11-15].

Результаты и их обсуждение

Допуская, что на всей поверхности трения цилиндрической поверхности контактное взаимодействие происходит аналогично рассматриваемому участку, необходимо ввести масштабный коэффициент, определяющий его размеры.

$$K_{\rm o} = \pi D / \left(2 \sqrt{q R_{max}} \right), \tag{1}$$

где *D* – диаметр вала; *q* – один из параметров, определяющих форму поверхности эллиптического параболоида; *R_{max}* – максимальная высота профиля шероховатости.

На участках геометрической площади контакта цилиндрической поверхности моделируется шероховатая поверхность, модель которой представляет собой набор деформируемых под нагрузкой эллиптических параболоидов 2-го порядка, вершины которых имеют определенный закон распределения (рис. 1).



- Рис. 1. Схема моделирования контакта цилиндрических поверхностей (расчетная):
 1,2 соответственно поверхности вала и втулки; L_к длина площадки контакта;
 у_r сближение контактирующих поверхностей; x_r уровень сечения модели поверхности; h_{ir} высота *i*-го выступа модели шероховатой поверхности;
 S_m средний шаг неровностей профиля шероховатости по средней линии;
 N_{ir} реакция *i*-го выступа; N внешняя приложенная сила
- **Fig. 1.** The scheme of modeling the contact of cylindrical surfaces (calculated): **1**,**2** respectively, the surfaces of the shaft and sleeve; L_{κ} the length of the contact area; y_r the convergence of the contacting surfaces; x_r the cross–section level of the surface model; h_{ir} the height of the i–th projection of the rough surface model; S_m the average step of roughness profile irregularities along the median line; N_{ir} reaction i-of the protrusion; N the external applied force

Для этой модели сечения, получаемые от пересечения профиля шероховатости плоскостью, перпендикулярной средней плоскости, будут параболами 2-го порядка, а плоскостью, параллельной средней плоскости – эллипсами (рис. 2). Учитывая [16-20], площадь сечения *i*-го параболоида на уровне *X_r* определится выражением

$$P_{ir} = z\pi p_r^2 (h_{ir} - x_r) / h_{ir}, \qquad (2)$$

где *z* – коэффициент, учитывающий соотношение длин осей эллиптических параболоидов.



Рис. 2. Форма выступов модели шероховатой поверхности: **1**, **2** – контактирующие поверхности трения; *p*_r, *p*_r, *p*_r, – соответственно длины поперечных осей эллипсов на уровне средней плоскости и уровне сечения *x*_r

Fig. 2. The shape of the protrusions of the rough surface model: **1**, **2** – contacting friction surfaces; p_r , p'_r – respectively the lengths of the transverse axes of the ellipses at the level of the middle plane and the cross-section level x_r

Закон и параметры распределения высот выступов параболоидов находятся, исходя из условия равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности и модели. Представим функцию плотности распределения высот выступов в виде экспоненциальной функции

$$(h_r) = \lambda e^{-\lambda(h_r - R_{max/2})}, \qquad (3)$$

где λ – параметр распределения.

Учитывая изменение значений высот выступов шероховатости (рис. 2, 3)

$$h_{ir} \hat{I}[R_{max} / 2; R_{max}],$$
 будем иметь

$$f(h_r) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda[h_r - R_{max}/2]) \\ 0; \end{cases};$$

$$R_{max}/2 \le h_r \le R_{max}$$

$$h_r < R_{max}/2, h_r > R_{max}.$$
(4)

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 10-24



Рис. 3. Функция плотности распределения высот выступов моделиFig. 3. The density function of the distribution of the heights of the protrusions of the model

Тогда функция (закон) распределения высот выступов (рис. 4) будет иметь вид

$$F(h_r) = \int (h_r) dh_r, \tag{5}$$

а с учетом (3) и пределов изменения значений h_r

$$F(h_r) = \begin{cases} 0; \\ 1 - \exp(-\lambda[h_w - R_{max}/2]); \\ 1; \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} h_r \leq R_{max}/2 \\ R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ h_r > R_{max}. \end{array}$$

$$(6)$$



Рис. 4. Функция (закон) распределения высот выступов модели

Fig. 4. The function (law) of the distribution of the heights of the protrusions of the model

Значения высот выступов будут определяться в результате решения уравнения $F(\xi) = h$, где h – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке [0; 1], который является областью изменения функции $F(h_r)$.

Случайная величина ξ имеет плотность распределения, аналогичную $f(h_r)$. Тогда

$$\eta = 1 - \exp(-\lambda [\xi - R_{\max}/2]). \tag{7}$$

Из (7) найдем

$$\xi = R_{\max}(0, 5 - \ln(1 - \eta)/\lambda).$$
 (8)

С учетом (6) и (8) высоты выступов распределятся следующим образом:

$$h_{ir} = \begin{cases} R_{max}/2; \\ R_{max}(0,5-\ln(1-\eta)/\lambda); \\ R_{max}; \end{cases}$$

$$\eta = 0$$

$$0 < \eta < \exp(-\lambda R_{max}/2)$$
(9)

$$\exp(-\lambda R_{max}/2) \le \eta \le 1.$$

Параметр распределения l, непосредственно влияющий на характер кривой $f(h_r)$, находится, исходя из равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности $t_p(x_r)$ и модели $\tilde{P}_r(x_r)$ на уровне сечения x_r , при решении уравнения

$$Z \int_{R_{\text{max}}/2}^{R_{\text{max}}} \left[\tilde{P}_{r}(\mathbf{x}_{r}) - \mathbf{t}_{p}(\mathbf{x}_{r}) \right]^{2} d\mathbf{x}_{r} \quad . \tag{10}$$

После интегрирования (10) будем иметь значение *l*, определяемое из кубического уравнения

$$0,024\lambda^{3} + \frac{0,6b(2^{\nu+2}-1)}{(\nu+2)2^{\nu+2}} + \frac{b(1-2^{\nu+2})}{(\nu+2)2^{\nu+2}} + \frac{1,38b(2^{\nu+2}-1)}{(\nu+2)2^{\nu+2}} = 0,$$
(11)

решаемого с помощью приближенных методов на ЭВМ.

Площадь сечения *i*-го параболоида для участков фактической площади контакта с учетом упругих деформаций выступов

$$P_{ir} = z\pi p_{\rm r}^2 \left(h_{ir} - x_r - y_{\rm ym,r} \right) / h_{\rm ir}, \qquad (12)$$

где величина упругих деформаций

$$y_{\rm yn,r} = (1-\mu^2) c k \sigma_{\rm T} P_{ir} / (\pi E).$$
 (13)

Реакция каждого выступа

$$N_{ir} = \operatorname{cks}_{\mathrm{T}} P_{ir} (1 + \mathrm{f}^2)^{0,5},$$
 (14)

где *f* – коэффициент трения.

Фактическая площадь на рассматриваемом участке контакта определится как сумма площадей сечений *i*-х параболоидов, вступивших в контакт.

$$P_r = \sum P_{ir}.$$
 (15)

Выступ модели считается вступившим в контакт, если выполняется условие

$$h_{ir} > x_r + y_{\text{VII.r}}.$$
 (16)

Параметры, характеризующие контактное взаимодействие цилиндрических поверхностей трения, рассчитываются путем проведения с помощью ЭВМ статистических испытаний на модели процесса контактного взаимодействия на основе реализации следующего алгоритма (рис. 5):

1. Ввод всех исходных данных для двух поверхностей, необходимых для расчета:

 – геометрические параметры сопряженных деталей (длина контакта и диаметр цилиндрических поверхностей);

– параметры качества поверхностных слоев вала и втулки (R_{max} , R_a , S_m , t_m , b, v, E, μ , c, σ_{T} , k и др.); требуемые эксплуатационные характеристики пары трения (нагрузка, скорость скольжения и др.).



Рис. 5. Блок-схема разработанной программы

Fig. 5. Flowchart of the developed program

2. Определение фактической площади контакта на рассматриваемом участке.Задается положение вершин параболоидов с шагом, равным среднему шагу неровностей профиля шероховатости по средней линии S_{mi} и распределение их высот h_{ir} , исходя из равенства опорных площадей профиля реальной поверхности и модели.

Задается некоторая величина сближения y_r , обусловленная уровнем сечения $x_r \in [R_{max}/2; R_{max}]$, (см. рис. 2), и оценивается выполнение неравенства

$$|(K_{o} \Sigma N_{ir} - N)/N| \le \varepsilon, \tag{17}$$

где N – внешняя приложенная сила; ε – погрешность.

Выполнение неравенства (17) свидетельствует о том, что найдена величина сближения, при которой сформировавшаяся фактическая площадь контакта способна выдержать внешнюю приложенную нагрузку.

3. Определение фактического давления в контакте.

Фактическое давление в контакте определяется с учетом сформировавшейся фактической площади контакта, способной выдержать внешнюю приложенную нагрузку, и выражения (15)

$$q_r = N/(P_r K_o).$$
 (18)

4. Расчет ожидаемой интенсивности изнашивания сопряженных цилиндрических поверхностей трения в соответствии с моделью изнашивания.

В качестве модели изнашивания цилиндрических поверхностей трения

предлагается кинетическая модель [16-20], представляемая в виде

$$J_h = K_j q_r^l v_{\scriptscriptstyle CK}^m k^n, \tag{19}$$

где J_h – интенсивность изнашивания; K_j – коэффициент изнашивания; q_r – фактическое давление в контакте; v_{ck} –скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения; k – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; l, m и n – коэффициенты модели.

Выражение (19) является моделью изнашивания трущихся цилиндрических поверхностей деталей триботехнических систем, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения.

Скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения $\upsilon = (\pi D n)/1000$.

Коэффициент упрочнения поверхностного слоя *k=HV/HV_{исх}*.

Значения фактического давления в контакте определяются из расчетов на модели контактного взаимодействия (выражение (18)).

Таким образом, учитывая (19), представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия, а также требуемые параметры качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметры шероховатости и коэффициент упрочнения.

В этом плане широкими возможностями обладает технология формирова-

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 10-24

ния износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электромеханическим упрочнением (ИКЭМО.)

При реализации технологии ИКЭМО методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа установлены значения коэффициентов K_j , l, m и n в модели изнашивания (19), которая с учетом этих значений принимает вид

$$J_{h} = 2,10 \cdot 10^{-10} \cdot q_{\rm r}^{0,15} \cdot \upsilon_{\rm c\kappa}^{0,08} \cdot k^{-0,42}.$$
 (20)

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{HCX} = 220$), варьировались в следующих пределах:

 $R_a = 1,61...2,59$ мкм; $R_{max} = 8,16...14,18$ мкм; $S_m = 122...171$ мкм; $t_m = 57...62\%$. Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности q – по плану эксперимента; скорость трения v – по плану эксперимента; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8 [6, 7, 8].

Исходные данные для множественного регрессионного анализа представлены в табл. 1. Осуществлялся план эксперимента типа 2³.

Технологическими факторами при обработке образцов при реализации технологии ИКЭМО являлись:

давление в контакте индентора с образцом х1(q_r), МПа: «-» – 10, «+» – 20;
скорость скольжения x₂(v_{ск}), м/мин (м/с): «-» – 31,4 (0,52), «+» – 62,8 (1,05);
коэффициент упрочнения поверхностного x₃(k): «-» – 2,2, «+» – 3,5.

Таблица 1. Исходные данные для множественного регрессионного анализа

№ опыта /	Технологические режимы ИКЭМО /			Интенсивность изнашива-
Experience	Technological modes of ICMO			ния $J_h \ge 10^{-10}$ / The intensi-
number	$x_1(q_r)$	$x_2(v_{c\kappa})$	$x_3(k)$	ty of wear $J_h \ge 10^{-10}$
1	_	—	_	2,22
2	+	—	_	3,41
3	_	+	_	3,30
4	+	+	_	3,62
5	_	—	+	2,44
6	+	—	+	2,79
7	_	+	+	2,57
8	+	+	+	2,86

Table 1. Initial data for multiple regression analysis

На рис. 6. приведены графики зависимостей: $J_h=f(q_r)$; $J_h=f(v_{cK})$; $J_h=f(k)$ при очередном варьировании одной из переменных q_r , v_{cK} , k в уравнении регрессии (20). Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений: $q_{rcp} = 15$ МПа; $v_{cK.cp} = 47,1$ м/мин; k = 2,85.

По результатам теоретических исследований разработано программное обеспечение для расчета контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей. Код программы написан на языке *«Object Pascal»* в среде программирования *«LAZARUS»*. В нем содержатся формализованные алгоритмы, соответствующие используемым моделям. Для последующего анализа по желанию пользователя исходные данные и результаты расчетов можно экспортировать в электронную книгу «*Excel*» в виде таблицы. Программа, для удобства ее использования, имеет визуальный интерфейс, удобный и понятный для пользователя.

Выводы

На основе моделирования контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей установлены основные факторы, влияющие на процесс их изнашивания, такие как: фактическая площадь контакта; величина сближения контактирующих поверхностей; фактическое давление; интенсивность изнашивания сопрягаемых цилиндрических поверхностей. Предложена кинетическая модель изнашивания, учитывающая параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя. С использованием полученной модели стало возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

Список литературы

1. Попов О.Н., Винокуров Г.Г. Применение теории марковских цепей для моделирования изнашивания поверхности трения порошковых материалов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 5 (61). С. 67-77.

2. Винокуров Г.Г., Старостин Е.Г., Попов О.Н. Использование теории марковских цепей для описания изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения // Вестник машиностроения. 2018. № 2. С. 35-40.

3. Пальчикова Г.С., Кривцов А.Н., Москалюк Д.Д. Анализ теории трения и изнашивания полимерных материалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7, № 1 (44). С. 279-282.

4. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тормозов авиаколес / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Бра-

ун, В.Д., Кожемякина Ю.Г. Сверчков, А.И Бакин., А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и износ. 2005. Т. 26, № 3. С. 261-268.

5. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектированиии тяжелонагруженных тормозов транспортных машин / А.В. Чичинадзе, В.Д. Кожемякина, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 31-37.

6. Инженерия поверхности деталей / колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

7. Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 5. С. 24 – 35. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35.

8. Справочник технолога / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров, А.П. Бабичев, П.Ю. Бочкарев, А.О. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. С. 391 – 398.

9. Горленко А.О. Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей электромеханической обработкой // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. № 1(91). С. 8 – 16.

10. Дегтярев Н.М., Пастухов А.Г. Механическая обработка крестовин карданных шарниров, упрочненных электромеханической обработкой // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 339-343.

11. Шец С.П., Горленко А.О., Болдырев Д.А. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта // Сталь. 2022. № 2. С. 27 – 32.

12. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, В.Б. Ильицкий, А.В. Тотай, А.В. Хандожко, А.О. Горленко [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. С. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533.

13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities // Tribology Transactions. 2015. № 58. P.148-157.

14. Ashby M.F., J Abulawi., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding // Tribology transactions, 1991. Vol.34, ser. 4. P. 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A.. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area // Steel in Translation. 2022. Vol. 52, № 2. P. 245 – 250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A.. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact // Steel in Translation. 2022. Vol. 52, № 5. P. 519 – 522. 17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Чернов, Г.С. Маслов, Е.И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85-90.

18. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

19. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

20. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

References

1. Popov O.N., Vinokurov G.G. Application of the theory of Markov chains for modeling the wear of the friction surface of powder materials. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova = Bulletin of the Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov.* 2017; (5): 67-77 (In Russ.).

2. Vinokurov G.G., Starostin E.G., Popov O.N. Using the theory of Markov chains to describe the wear of powder coatings under sliding friction. *Vestnik mashinostroeniy = Bulletin of Mechanical Engineering*. 2018; (2): 35-40 (In Russ.).

3. Palchikova G.S., Krivtsov A.N., Moskalyuk D.D. Analysis of the theory of friction and wear of polymer materials. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovanii XXI veka:* teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2019; 7(1): 279-282 (In Russ.).

4. Chichinadze A.V., Brown E.D., Kozhemyakina V.D., Sverchkov Yu.G., Bakin A.I., Suvorov A.V., Kokonin S.S. Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solids in the design of brakes of aircraft wheels]. *Trenie i iznos = Friction and wear*. 2005; 26(3): 261-268 (In Russ.).

5. Chichinadze A.V., Kozhemyakina V.D., Suvorov A.V., Kokonin S.S. Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solids in the design of

heavily loaded brakes of transport vehicles. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* = *Friction and lubrication in machines and mechanisms*. 2009; (5): 31-37 (In Russ.).

6. Surface engineering of parts. Suslov A.G. (ed.). Moscow: Mechanical Engineering; 2008. 320 p. (In Russ.).

7. Gorlenko O. A., Shevtsov M. Yu., Ageeva E. V. The Formation of the Friction Surface of Machine Parts of Wear Resistant Gradient Structures by Means of Combined Electromechanical Processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018; 22(5): 24-35 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35.

8. Suslov A.G., Bezylagny V.F., Bazrov B.M., Babichev A.P., Bochkarev P.Yu., Gorlenko A.O., et al. Handbook of technologist. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2019. P. 391-398 (In Russ.).

9. Gorlenko A.O. Improving the quality of the surface layer and the operational properties of parts by electromechanical processing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High-tech technologies in mechanical engineering.* 2019; 1: 8-16 (In Russ.).

10. Degtyarev N.M., Pastukhov A.G. Mechanical processing of the crosspieces of cardan joints reinforced with electromechanical treatment. *Agrotekhnika i energoobespechenie* = *Agrotechnics and energy supply*. 2014; (1): 339-343 (In Russ.).

11. Shets S.P., Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Wear of steel friction pairs at the level of the actual contact spot]. Stal'=Steel, 2022. (2): 27-32 (In Russ.).

12. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., Ilyitsky V.B., Totai A.V., Khandozhko A.V., Gorlenko A.O. et al. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie. 2022. P. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533 (In Russ.).

13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities. *Tribology Transactions*. 2015; (58): 148-157.

14. Ashby M.F., Abulawi J., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding. *Tribology transactions*. 1991; 34 (4): 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area. *Steel in Translation*. 2022; 52(2): 245-250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact. *Steel in Translation*. 2022; 52(5): 519 – 522.

17. Ageev E.V., Ageeva E.V., Chernov A.S., Maslov G.S., Parshina E.I. Determination of the main regularities of the process of obtaining powders by the method of electroerosive dispersion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2013; (1): 85-90 (In Russ.).

18. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tikhonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E. V. Promising steels for blast furnace housings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo* gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2017; 7(2): 6-15 (In Russ.).

19. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Skotnikova M.A., Fadin Yu.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev A.N., Ageev E.V. Investigation of anti-wear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016; (1): 75-82 (In Russ.).

20. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Sergeev A.N., Maliy D.V., Provotorov D.A.Tribotechnical properties of plastic lubricating composite materials with fillers from dispersed particles of copper and zinc. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016; (2): 109-119 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Горленко Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортнотехнологические комплексы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0807-9537, e-mail: bugi12@bk.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8491-2829, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Шевцов Михаил Юрьевич, аспирант кафедры «Трубопроводные транспортные системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5457-6342, e-mail: mih09mmo@yandex.ru Alexander O. Gorlenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Land Transport and Technological Complexes Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0807-9537, e-mail: bugi12@bk.ru

Evgeny V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8491-2829, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Mikhail Yu. Shevtsov, Post-Graduate Student, Pipeline Transport Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5457-6342, e-mail: mih09mmo@yandex.ru