

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>

## Модель изнашивания трущихся шероховатых поверхностей

А.О. Горленко <sup>1</sup>, Е.В. Агеев <sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Брянский государственный технический университет  
бул. 50 лет Октября 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev\_ev@mail.ru

## Резюме

**Цель исследования.** Разработать модель изнашивания, учитывающую параметры качества поверхностного слоя и условия трения, которая позволит путем управляемого технологического воздействия обеспечить требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

**Методы.** Требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения позволяет обеспечить электро-механическая обработка (ЭМО), в частности проводимая на отделочно-упрочняющих режимах.

Повышение износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных свойств, а вместе с тем изменение физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей достигается сочетанием на поверхности обрабатываемой детали термического и силового воздействий. Для достижения этого эффекта разработана оригинальная установка, которая включает в себя устройство для механической обработки на основе универсального станка с комплектом необходимого инструмента и приспособлений для закрепления обрабатываемой детали и подвода смазочно-охлаждающей жидкости и электрического тока большой силы и малого напряжения, а также преобразователя промышленного электроток и блоков управления режимами обработки, средств коммутации и ЭВМ.

**Результаты.** Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания. На основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия. Разработанная модель изнашивания, учитывающая параметры качества поверхностного слоя и условия трения, позволяет путем управляемого технологического воздействия обеспечить требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

**Заключение.** Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.

**Ключевые слова:** поверхностный слой; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; износостойкость; модель изнашивания; триботехнические испытания.

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

**Для цитирования:** Горленко А.О., Агеев Е.В. Модель изнашивания трущихся шероховатых поверхностей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 25-37. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>.

Поступила в редакцию 15.01.2021

Подписана в печать 10.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Wear Model of Sliding Rough Surfaces

Alexandr O. Gorlenko <sup>1</sup>, Evgeny V. Ageev <sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Bryansk State Technical University  
bul. 50 Let Oktyabrya 7, Bryansk 241035, Russian Federation

<sup>2</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev\_ev@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** To develop a wear model that takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, which will allow, through controlled technological action, providing the required wear intensity of friction surfaces.

**Methods.** Electromechanical processing, in particular, can provide the required intensity of friction surfaces wear being carried out in finishing and strengthening modes.

An increase in wear resistance, endurance limit and other operational properties, and at the same time a change in the physical, mechanical and geometric parameters of the surface layer of parts is achieved by a combination of thermal and force influences on the surface of the processed part. To achieve this effect, an original installation has been developed, which includes a device for machining based on a universal machine with a set of necessary tools and devices for fixing a workpiece and supplying coolant and electric current of high power and low voltage, as well as an industrial electric current converter and control units for processing modes, switching devices and computers.

**Results.** An approach to the representation of the nature of friction and wear has been proposed. Based on the proposed wear model, which takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, it is possible to provide the required wear intensity of friction surfaces through controlled technological action.

The developed wear model, which takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, makes it possible to provide the required wear intensity of friction surfaces through controlled technological action.

**Conclusion.** The calculated data obtained with the help of the developed model and the data obtained experimentally will find practical application in creating resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.

**Keywords:** surface layer; surface layer quality; friction; wear; wear resistance; wear model; tribotechnical tests.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Gorlenko A. O., Ageev E. V. Wear Model of Sliding Rough Surfaces. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 25-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>.

Received 15.01.2021

Accepted 10.02.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

### Введение

В настоящее время существуют известные теории трения и изнашивания,

в том числе учитывающие молекулярные (адгезионные) и механические (де-

формационные) составляющие процесса. Недостатком данных теорий является то, что они не в полной мере учитывают параметры качества сопряженных поверхностей трения [1-5].

Предлагается следующий подход к оценке природы процессов трения и изнашивания. Природа трения заключается в процессе контакта относительно перемещающихся поверхностей, имеющих неровности профиля и склонность к межатомному взаимодействию, приводящем к изменению микрогеометрических и физико-механических характеристик сопряжения.

Природа изнашивания заключается в наличии напряжений в материалах контактирующих поверхностей, которые стремятся избавиться от них диспергированием отдельных частиц различной размерности, приближаясь к минимуму производства энтропии [6-12].

Методология проведения теоретических исследований представлена на рис. 1.

**Целью настоящей работы являлось** обеспечение требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия на основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения.

## Материалы и методы

Методика проведения практических исследований представлена на рис. 2.

Для достижения этого эффекта разработана оригинальная установка, которая включает в себя устройство для механической обработки на основе универсального станка с комплектом необходимого инструмента и приспособлений для закрепления обрабатываемой детали и подвода смазочно-охлаждающей жидкости и электрического тока большой силы и малого напряжения, а также преобразователя промышленного электротока и блоков управления режимами обработки, средств коммутации и ЭВМ (рис. 3).

## Результаты и их обсуждение

При электромеханической обработке методами линейного регрессионного анализа установлены значения коэффициентов  $K_J$ ,  $m$  и  $n$  в модели изнашивания

$$J_h = K_J C_X^m C_F^n, \quad (1)$$

которое с учетом этих значений принимает вид

$$J_t = 38,82 C_X^{0,11} C_F^{1,21}, \quad (2)$$

причем значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 40ХН и высокопрочного чугуна ВЧ-50, а также условия трения варьировались в следующих пределах:  $Ra = 0,4-3,2$  мкм;  $Wz = 5,6-16,8$  мкм;  $Hmax = 11-25$  мкм;  $tm = 50-72\%$ ;  $Sm = 38-140$  мкм;  $k = 1,5-3,5$ ;  $\lambda' = 1,0-1,4$ ;  $f = 0,1-0,3$ ;  $q = 1,6-4,0$  МПа;  $v = 0,2-1,1$  м/с. Исходные данные для линейного регрессионного анализа представлены в табл. 1.

В соответствии с методологией проведения теоретических исследований в качестве модели изнашивания поверхностей трения предлагается кинетическая модель, представляемая в виде:

$$J_h = K_J C_X^m C_F^n,$$

где  $J_h$  – интенсивность изнашивания;

$K_J$  – коэффициент изнашивания;

$C_X$  – параметр, характеризующий качество поверхностного слоя;

$C_F$  – параметр, характеризующий условия трения;

$m, n$  – коэффициенты.

Данное выражение является моделью изнашивания трущихся поверхностей деталей триботехнических систем, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения

Параметр  $C_X$  характеризует влияние микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностного слоя

$$C_X = \frac{(Ra \ Wz \ H \max)^{1/6}}{tm^{3/2} Sm^{1/2} k^{2/3} \lambda'},$$

где  $Ra, tm, Sm, Wz$  и  $H \max$  – параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений;  $k$  – коэффициент упрочнения поверхностного слоя;  $\lambda'$  – коэффициент, учитывающий влияние остаточных напряжений

Параметр  $C_F$  определяется исходя из следующих соображений. Триботехническая система, обменивающаяся с окружающей средой теплом (в результате действия силы трения) и массой (в результате наличия диспергированных в процессе износа частиц), находится в состоянии равновесия при минимуме рассеяния энергии (производства энтропии), стабилизации процесса тепловыделения, установившемся процессе изнашивания, формировании равновесного состояния поверхностного слоя и, следовательно, минимальном износе трущихся поверхностей.

$$C_F = \frac{fqv}{[Q_{уд}]},$$

где  $f$  – коэффициент трения;

$q$  – давление в зоне контакта;

$v$  – скорость относительного скольжения сопряженных поверхностей трения;

$[Q_{уд}]$  – допустимая удельная мощность трения.

Параметр  $C_F$  является безразмерной величиной, показывающей, насколько удельная мощность трения ( $fqv$ ) в реальном случае отличается от допустимой по справочным данным ( $[Q_{уд}]$ ). Его значение должно стремиться к минимальному, насколько позволяют добиться этого возможности технологических методов отделочно-упрочняющей обработки

Значение коэффициента трения определяется в соответствии с положениями молекулярно-механической теории трения

$$f = \frac{\tau_0}{HV} + \beta' + T_m,$$

где  $\tau_0$  – сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю;

$HV$  – микротвердость поверхностного слоя,  $HV = kHV_{исх}$ ;  $\beta'$  – коэффициент упрочнения молекулярных связей;  $T_m$  – механическая составляющая коэффициента трения, характеризующая влияние макроотклонений, волнистости, шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя на процесс трения, определяемая как

$$T_m = \frac{8\pi\alpha_s (k\sigma_m)^{1/3}}{tm} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi q_0 Ra \ Wz \ H \ max)^{1/3}}{E \ Sm \ tm}}$$

Таким образом, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия с целью обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметров шероховатости, волнистости, макроотклонений, а также коэффициента упрочнения поверхностного слоя

Рис. 1. Методология теоретических исследований

Fig. 1. Methodology of theoretical research

Требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения позволяет обеспечить электромеханическая обработка (ЭМО), в частности проводимая на отделочно-упрочняющих режимах.

Электромеханическая обработка основана на сочетании термического и силового воздействий на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к изменению физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей и, как следствие, к повышению износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных свойств.

Сущность метода ЭМО заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента и заготовки проходит ток большой силы и низкого напряжения.

Высокое сопротивление зоны контакта приводит к сильному нагреву контактирующих микронеровностей обрабатываемой поверхности

Под силовым воздействием инструмента они деформируются и

Поверхностный слой упрочняется за счет быстрого отвода тепла в основную массу материала и скоростного охлаждения от температуры фазового превращения металла. При этом разогрев до температур фазовых превращений является необходимым условием упрочняющих режимов обработки

Технология ЭМО была реализована на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий из

Инструмент и приспособления для закрепления обрабатываемой детали

Универсальный станок (применяемый для механической обработки заготовок)

Инструмент и приспособления для подвода электрического тока большой силы и малого напряжения

Силовой блок для преобразования промышленного электрического тока

Блок управления режимами обработки

Средства коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды

Блок сопряжения с ПЭВМ

Рис. 2. Методика практических исследований

Fig. 2. Methodology of practical research



Рис. 3. Установка для электромеханической обработки

Fig. 3. Installation for electrical and mechanical processing

Таблица 1. Исходные данные для расчета коэффициентов  $K_j$ ,  $m$  и  $n$  в модели изнашивания

Table 1. Initial data for calculating the coefficients  $K_j$ ,  $m$  and  $n$  in the wear model

№ опыта / Experience No.	Технологические режимы ЭМО / Technological modes of EMP			Параметр $C_X$ / Parameter $C_X$	Параметр $C_F$ / Parameter $C_F$	Интенсивность изнашивания $J_h \times 10^{-11}$ / The wear rate $J_h \times 10^{-11}$
	$j$ , А/мм <sup>2</sup> / $j$ , А/мм <sup>2</sup>	$p$ , МПа / $p$ , МПа	$v_0$ , м/сек / $v_0$ , м/сек			
1	450	20	0,01	0,311	0,254	12,8
2	550	10	0,02	0,293	0,254	9,7
3	700	20	0,02	0,291	0,254	8,1
4	900	10	0,01	0,253	0,254	3,6
5	500	12,5	0,03	0,401	0,123	2,88
6	750	7,5	0,046	0,384	0,118	2,38
7	825	12,5	0,03	0,361	0,118	2,16
8	875	7,5	0,046	0,283	0,037	0,98
9	875	12,5	0,03	0,309	0,123	1,12

**Примечание:**  $j$  – плотность тока;  $p$  – давление роликов-электродов;  $v_0$  – скорость обработки  
**Note:**  $j$  – current density;  $p$  – pressure of the electrode rollers;  $v_0$  – processing speed

При алмазном выглаживании и точении образцов, изготовленных из сталей 45 и 18ХГТ методами линейного регрессионного анализа по данным, приведенным в табл. 2, установлена

тесная корреляционная зависимость между интенсивностью изнашивания и параметром  $C_X$  (коэффициент парной корреляции  $R = 0,89$ )

$$J_h = 9,333 \cdot 10^{-9} C_X^{1,335}. \quad (3)$$

Сравнение значений интенсивности изнашивания, рассчитанных с использованием выражения (3) и полученных экспериментальным путем, позволяет считать рассматриваемый подход к определению интенсивности изнашивания как функции от параметра  $C_X$  вполне обоснованным.

Исследования по технологическому обеспечению требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения путем управления значением параметра  $C_X$

проводились на образцах, изготовленных из стали 45 с применением технологических методов, в частности алмазного выглаживания и точения (табл. 3, 4).

Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [13-20].

**Таблица 2.** Фактическое  $J_h$ , ожидаемое  $\hat{J}_h$ , значение интенсивности изнашивания образцов и параметра  $C_X$

**Table 2.** Actual  $J_h$ , expected  $\hat{J}_h$ , value of the wear rate of the samples and the parameter  $C_X$

$J_h \times 10^{-9}$	$\hat{J}_h \times 10^{-9}$	$C_X$	$J_h \times 10^{-9}$	$\hat{J}_h \times 10^{-9}$	$C_X$
2,51	1,71	0,28	40,9	5,36	0,66
3,31	3,31	0,46	4,51	6,24	0,74
3,01	2,21	0,34	4,01	5,04	0,63
2,17	0,81	0,16	3,81	4,51	0,59
3,16	2,47	0,37	6,52	8,23	0,91
3,74	4,51	0,58	8,02	10,09	1,06
3,16	2,56	0,38	4,26	5,8	0,7
2,84	1,95	0,31	3,91	4,93	0,62

**Таблица 3.** Результаты испытаний на изнашивание (алмазное выглаживание)

**Table 3.** The results of testing for wear (diamond smoothing)

№ образца / Sample no.	Диаметр образца, мм / The diameter of the specimen, mm	$C_{X \text{ расч}} / C_X$ estimated value	$P_n$ , Н / $P_n$ , Н	Условия трения / Friction conditions		$J_h \times 10^{-9} /$ $J_h \times 10^{-9}$
				$q$ , МПа / $q$ , МПа	$v$ , м/с / $v$ , m / s	
1	35	0,38	125	2,8	0,57	7,4
2	50	0,32	160	2,2	0,8	7,0
3	65	0,28	195	1,7	1,1	6,7

**Примечание:**  $P_n$  – усилие выглаживания. Остальные режимы выглаживания:  $R_u = 1,5$  мм (радиус индентора);  $S_n = 0,075$  мм/об (продольная подача);  $v_0 = 10$  м/мин (скорость обработки).  $C_{X \text{ исх}} = 0,85$ .

**Note:**  $P_n$  – smoothing force. Other smoothing modes:  $R_u = 1.5$  mm (indenter radius);  $S_n = 0.075$  mm / rev (longitudinal feed);  $v_0 = 10$  m / min (processing speed).  $C_{X \text{ исх}} = 0.85$

**Таблица 4.** Результаты испытаний на изнашивание (точение)**Table 4.** The results of testing for wear (turning)

№ образца / Sample no.	Диаметр образца, мм / The diameter of the specimen, mm	$C_{X \text{ расч}} / C_X$ estimated value	$S_n$ , мм/об / $S_n$ , mm / revolution	Условия трения / Friction conditions		$J_h \times 10^{-7} / J_h \times 10^{-7}$
				$q$ , МПа / $q$ , MPa	$v$ , м/с / $v$ , m / s	
1	35	0,72	0,06	2,8	0,57	11,3
2	50	0,64	0,09	2,2	0,8	10,7
3	65	0,59	0,125	1,7	1,1	10,2
<p><b>Примечание:</b> <math>S_n</math> – продольная подача. Остальные режимы обработки: <math>v_{\text{рез}} = 80</math> м/мин (скорость резания); <math>t_{\text{рез}} = 0,1</math> мм (глубина резания). <math>C_{X \text{ исх}} = 0,85</math></p> <p><b>Note:</b> <math>S_n</math> – longitudinal feed. Other modes of treatment: <math>v_{\text{рез}} = 80</math> m / min (cutting speed); <math>t_{\text{рез}} = 0,1</math> mm (cutting depth). <math>C_{X \text{ initial}} = 0,85</math></p>						

## Выводы

1. Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания.
2. На основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры

качества поверхностного слоя и условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия.

## 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 проектировании тяжело нагруженных 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(80). С. 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.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2019. С. 391 – 398.

9. Горленко А.О. Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей электромеханической обработкой // Научные 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. Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Обработка поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой // Технология машиностроения и материаловедение. 2018. № 2. С. 33-38.

12. Чернова Н.А., Семёнова А.В., Воронина М.В. Эффективность электромеханической обработки деталей, предназначенных для художественной обработки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2019. № 7. С. 134-136.

13. 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.

14. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

15. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

16. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.

17. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 1. С. 19-22.

18. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н., Гадалов Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

19. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 138-144.

20. Получение твердосплавных изделий холодным изостатическим прессованием электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, П.И. Бурлак, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 116-125.

## References

1. Popov O. N., Vinokurov G. G. *Primenenie teorii markovskikh tsepei dlya modelirovaniya iznashivaniya poverkhnosti treniya poroshkovykh materialov* [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 North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov*, 2017, no. 5 (61), pp. 67-77 (In Russ.).

2. Vinokurov G. G., Starostin E. G., Popov O. N. *Ispol'zovanie teorii markovskikh tsepei dlya opisaniya iznashivaniya poroshkovykh pokrytii pri trenii skol'zheniya* [Using the theory of Markov chains to describe the wear of powder coatings during sliding friction]. *Vestnik mashinostroeniya = Vestnik Mashinostroeniya*, 2018, no. 2, pp. 35-40 (In Russ.).

3. Palchikova G. S., Krivtsov A. N., Moskalyuk D. D. *Analiz teorii treniya i iznashivaniya polimernykh materialov* [Analysis of the theory of friction and wear of polymer materials]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2019, vol. 7, no. 1 (44), pp. 279-282 (In Russ.).

4. Chichinadze A.V., Brown E. D., Kozhemyakina D. V., Crickets Y. G., Bakin A. I., Suvorov A.V., Kokonin S. S. Primenenie teorii teplovoi dinamiki i modelirovaniya treniya i iznashivaniya tverdykh tel pri proektirovanii tormozov aviakoles [Application of theories of thermal dynamics and simulation of friction and wear of solids in the design of brakes avia-coles]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 261-268 (In Russ.).

5. Chichinadze A.V., Kozhemyakina V. D., Suvorov A.V., Kokonin S. S. Primenenie teorii teplovoi dinamiki i modelirovaniya treniya i iznashivaniya tverdykh tel pri proektirovani ti tyazhelonagruzhennykh tormozov transportnykh mashin [Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solid bodies in the design of heavily-loaded brakes of transport machines]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizмах = Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2009, no. 5, pp. 31-37 (In Russ.).

6. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Engineering of the surface of parts]; ed. by A. G. Suslov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (In Russ.).

7. Gorlenko A. O., Shevtsov M. Yu., Ageeva E. V. Formirovanie v poverkhnosti treniya detalei mashin gradientnykh iznosostoikikh struktur s pomoshch'yu kombinirovannoi elektromekhanicheskoi obrabotki [Formation of gradient wear-resistant structures in the friction surface of machine parts using combined electromechanical processing]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 5(80), pp. 24 – 35 (In Russ.).

8. Suslov A. G., Bezhyazichny V. F., Bazrov B. M., Babichev A. P., Bochkarev P. Y., Gorlenko A., etc. *Spravochnik tekhnologa* [Directory technologist]. Moscow, 2019, pp. 391 – 398 (In Russ.).

9. Gorlenko A. O. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya i ekspluatatsionnykh svoistv detalei elektromekhanicheskoi obrabotki [Improving the quality of the surface layer and the operational properties of parts of Electromechanical treatment]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, no. 1(91), pp. 8 – 16 (In Russ.).

10. Degtyarev N. M., Shepherds A. G. Mekhanicheskaya obrabotka krestovin kardannykh sharnirov, uprochnennykh elektromekhanicheskoi obrabotki [Machining of universal joints universal joints, hardened electro-mechanical treatment]. *Agrotekhnika i energoobespechenie = Agriculture and Energy Supply*, 2014, no. 1 (1), pp. 339-343 (In Russ.).

11. Gorlenko A. O., Shevtsov M. Yu. Obrabotka poverkhnostnostei treniya kombinirovannoi elektromekhanicheskoi obrabotki [Processing of friction surfaces by combined electromechanical processing]. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie = Tekhnologiya Mashinostroeniya i Materialovedenie*, 2018, no. 2, pp. 33-38 (In Russ.).

12. Chernova N. A., Semenova A.V., Voronina M. V. Effektivnost' elektromekhanicheskoi obrabotki detalei, prednaznachennykh dlya khudozhestvennoi obrabotki [Efficiency of electromechanical processing of parts intended for artistic processing]. *Avtomatizirovannoe*

*proektirovanie v mashinostroenii* = *Computer-aided Design in Mechanical Engineering*, 2019, no. 7, pp. 134-136 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., I Tikhonova. V., Kutepov S. N., Kuzovleva O. V., Ageev E. V. Perspektivnye stali dlya kozhukhov domennykh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 6-15 (In Russ.).

14. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decision-making on statistical models in product quality management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 5 (74), pp. 78-92 (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruksionnykh stalei [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 6 (75), pp. 85-95 (In Russ.).

16. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Provedenie rentgeno-spektral'nogo mikroanaliza tverdospлавных электро-эрозийных порошков [Conducting X-ray spectral microanalysis of hard-alloy electroerosive powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 5-2 (44), pp. 99-102 (In Russ.).

17. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdospлавных электроэрозийных порошков v kachestve elektrodного материала [Evaluation of the effectiveness of the use of hard-alloy electroerosive powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 19-22 (In Russ.).

18. Ageev E. V., Gadlov V. N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye электроэрозийным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал dlya vosstanovleniya detalei avtotraktorной техники [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for restoring parts of automotive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

19. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Ageeva E. V., Latypov R. A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh электроэрозийным диспергированием твердого сплава [Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive

dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 138-144 (In Russ.).

20. Ageeva E. V., Latypov R. A., Burak P. I., Ageev E. V. Poluchenie tverdosplavnykh izdelii kholodnym izostaticheskim pressovaniem elektroerozionnykh poroshkov i ikh issledovanie [Obtaining hard-alloy products by cold isostatic pressing of electroerosive powders and their research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 116-125 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Горленко Александр Олегович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: bugi12@bk.ru, SPIN-код: 4377-4421, AuthorID: 175172

**Alexander O. Gorlenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Road Transport, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: bugi12@bk.ru, SPIN-код: 4377-4421, AuthorID: 175172

**Агеев Евгений Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev\_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>

**Evgeny V. Ageev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev\_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>