



Оценка триботехнических свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки

С. А. Величко, А. В. Мартынов , Е. Г. Мартынова

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет (г. Саранск, Российская Федерация)

 martynov-230685@yandex.ru

Аннотация

Введение. К сельскохозяйственной отрасли глубокой переработки сырья с ориентацией на конечного потребителя относится хлебопекарная промышленность. При производстве хлебобулочных изделий одну из операций технологического процесса выполняют тестоделительные машины вакуумно-поршневого типа, срок службы которых на 30–40 % ниже нормативного. Наиболее перспективным для восстановления изношенных деталей механизма всасывания является метод электроискровой обработки. При выборе материалов электрода важно, чтобы они обладали не только низкой эрозийной стойкостью, но и высокими триботехническими свойствами.

Цель статьи. Выбрать электроискровые покрытия, снижающие изнашивание рабочих поверхностей деталей механизма всасывания при ремонте тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Материалы и методы. Определение свойств электроискровых покрытий проводилось методами неразрушающего контроля с использованием современного научно-исследовательского оборудования, а обработка результатов с использованием программы «Компас-3D».

Результаты исследования. Получены значения физических, механических, фрикционных и триботехнических свойств электроискровых покрытий из бронзы БрОС10-10 и сплава Х15Н60. Суммарная интенсивность изнашивания для покрытия из бронзы БрОС10-10 составила $8,3 \cdot 10^{-12}$, а для сплава Х15Н60 $15 \cdot 10^{-12}$.

Обсуждение и заключение. Суммарная интенсивность изнашивания на машине трения у образцов с покрытием из бронзы БрОС10-10 ниже, чем у базовой пары трения, в 1,4 раза, а у образцов с покрытием из сплава Х15Н60 выше в 1,26 раза. Добавление твердосмазочного покрытия MODENGY на покрытие из сплава Х15Н60 способствует снижению его истирающей способности в 3 раза, а суммарной интенсивности изнашивания — в 1,34 раза относительно базовой пары трения. Расчетно-экспериментальный метод показал низкую интенсивность изнашивания электроискровых покрытий из бронзы БрОС10-10 и сплава Х15Н60 по отношению к материалу деталей механизма всасывания тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Ключевые слова: тестоделительная машина вакуумно-поршневого типа, электроискровая обработка, интенсивность изнашивания, разрушающее напряжение, модуль упругости, фрикционные параметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Величко С. А., Мартынов А. В., Мартынова Е. Г. Оценка триботехнических свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 79–99. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.079-099>

Original article

Assessment of Tribotechnical Properties of Consolidated Materials Obtained by Electrosark Processing

S. A. Velichko, A. V. Martynov✉, E. G. Martynova

National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

✉ martynov-230685@yandex.ru

Abstract

Introduction. The bakery industry is an agricultural industry of high-level processing of raw materials focuses on the end-consumer. In the production of bakery products one of the operations of the technological process is performed by dough dividers of vacuum-piston type, whose service life is 30–40% lower than the normative. The most promising method for restoration of worn parts of the suction mechanism is electrosark processing. When selecting the electrode material, it is important that they have not only low erosion resistance, but also high tribotechnical properties.

Aim of the Article. The article deals with problem of selecting electric coatings to reduce wear of working surfaces of suction mechanism parts during repair of vacuum piston-type dough dividers.

Materials and Methods. The analysis of the properties of electrosark coatings was carried out by nondestructive testing methods using modern research equipment; the results were processed using the Compass-3D program.

Results. There are determined the values of physical, mechanical, frictional and tribotechnical properties of electrosark coatings made of BrOS10-10 bronze and Kh15N60 alloy. The total wear rate for BrOS10-10 bronze coating was $8,3 \cdot 10^{-12}$, and for Kh15N60 alloy $15 \cdot 10^{-12}$.

Discussion and Conclusion. Total wear rate on the friction machine of bronze coated samples is lower than that of basic friction pair in 1.4 times, and of alloy coated samples – higher in 1.26 times. Adding of MODENGY solid-lubricant coating to the coating from the alloy reduces its abrasion ability by 3 times, and the total wear rate – by 1.34 times in comparison with the base friction pair. The used calculation-experimental method showed low wear rate of electrosark coatings of bronze and alloy in relation to the material of parts of the suction mechanism of vacuum-piston-type dough dividing machines.

Keywords: vacuum-piston type dough divider, electric spark treatment, wear rate, destructive stress, modulus of elasticity, friction parameters

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Velichko S.A., Martynov A.V., Martynova E.G. Assessment of Tribotechnical Properties of Consolidated Materials Obtained by Electrosark Processing. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):79–99. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.079-099>

Введение

Пищевая индустрия занимается переработкой сельскохозяйственной продукции с ориентацией или на источники сырья, или на конечного потребителя.

Хлебопекарная промышленность относится к сельскохозяйственной отрасли глубокой переработки сырья и обеспечивает население страны продуктами первой необходимости: хлебом,

хлебобулочными и бараночными изделиями.

При производстве хлебобулочных изделий наиболее важным является получение заготовок теста одинаковой массы. Эту операцию выполняют тестоделительные машины¹. Широкое применение в хлебопекарной промышленности по способу нагнетания теста находят тестоделительные машины вакуумно-поршневого типа, достоинством которых является точное деление тестовых заготовок массой от 50 г из ржаной и пшеничной муки. Они бережно относятся к тесту, не травмируют клейковину. К одной из таких машин, широко используемых на территории России и стран СНГ, относится ТД-4 фирмы ЗАО НПП «Восход» (рис. 1) [1].



Р и с. 1. Общий вид тестоделительной машины ТД-4

F i g. 1. General view of the TD-4 dough divider

Срок службы тестоделительных машин при соблюдении всех регламентов эксплуатации, указанных в технической документации, составляет более 10 лет [1]. Однако в реальных условиях эксплуатации срок службы не превышает 6–7 лет [1; 2].

Работоспособность тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа определяет механизм всасывания делительного устройства, при износе деталей которого происходит потеря вакуума и, как следствие, нарушается точность развесовки теста.

В настоящее время ремонт тестоделительных машин осуществляется полной заменой узла механизма всасывания на новый, изготовленный под заказ заводом-изготовителем. Себестоимость такого ремонта достигает 30–40 % от стоимости новой машины, а срок окупаемости составляет 3–4 года в зависимости от номенклатуры хлебобулочных изделий и режима работы оборудования [3; 4].

Анализ методов восстановления деталей показал, что наиболее перспективным для восстановления деталей является метод электроискровой обработки (ЭИО). Из таблицы 1 видно, что источники энергии для формирования электрической искры в газовой среде обладают лучшими энергетическими характеристиками² [5; 6].

Сравнение гальванических методов и электроискровой обработки по технико-экономическому критерию показал, что во втором случае комплексный показатель оценки ниже в 5,1 раза³ [5].

¹ Коляда Е. В. Совершенствование технологии функциональных сортов хлебобулочных изделий // Менеджмент и маркетинг: опыт и проблемы : сб. науч. трудов. Минск : изд-во «Белорусский государственный экономический университет», 2011. С. 207–212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49207972> (дата обращения: 06.10.2022) ; Широкова Н. В., Гордиенко С. А. Разработка технологии пшеничного хлеба с функциональными добавками // Теория и практика современной аграрной науки : сб. V национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. Новосибирск, 2022. С. 1139–1141. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48267734> (дата обращения: 06.10.2022).

² Астанин В. К., Пухов Е. В., Емцев В. В. Использование стационарных и нестационарных режимов осаждения электролитических покрытий для восстановления автотракторной техники // Автотранспортная техника XXI века : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. М. : Мегapolis, 2018. С. 105–111.

³ Там же.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Энергетические характеристики термических источников энергии, применяемых для восстановления параметров изношенных деталей
Energy characteristics of thermal energy sources used to restore the parameters of worn parts

Источники энергии / Power sources	Температура пламени, плазмы или дуги, °К / Temperature of flame, plasma or arc, °K	Наименьшая площадь нагрева, мм ² / Smallest heating area, mm ²	Наибольшая плотность мощности энергии в пятне, Вт/мм ² / Maximum power density in the spot, W/mm ²
Газовое пламя / Gas flame	3 000–3 500	1	$5 \cdot 10^2$
Топливо-плазменное пламя / Fuel-plasma flame	4 000–5 000	1	$5 \cdot 10^2$
Дуга в парах / Arc in vapor:			
щелочных металлов / alkaline metals	4 000–5 000	1	$1 \cdot 10^3$
железа / iron	5 000–6 000	1	$1 \cdot 10^3$
Дуга в газах / Arc in gases:			
водород, азот / hydrogen, nitrogen	5 000–8 000	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^3$
аргон, гелий / argon, helium	10 000–20 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$
Микроплазменная дуга / Microplasma arc	–	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6$
Электронный луч / Electron beam	–	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^7$
Лазерный луч / Laser beam	–	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^8$
Электрическая искра в газовой среде / Electric spark in a gas environment	7 000–20 000	$1 \cdot 10^{-6}$	10^6 – 10^9

Сущность метода электроискровой обработки состоит в том, что под воздействием электрического импульсного разряда в газовой среде происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии на катод.

В отличие от технологий, где источник тепла и рабочий материал формируются отдельно, электрическая искра как технологический инструмент осуществляет разрушение электрода и формирование на поверхности детали покрытия с измененным поверхностным слоем (ИПС) [7; 8].

В результате высокой мощности энергии в пятне нагрева импульсного действия и перемещения материала в ИПС, в зависимости от выбранных электродных материалов и принятых

режимов в широком диапазоне, изменяются физико-механические свойства рабочих поверхностей деталей, что в конечном итоге позволяет формировать покрытия с высокими триботехническими свойствами.

Прогнозирование высоких триботехнических свойств электроискровых покрытий объясняется не только структурными изменениями, но и особенностями параметров топографии. Их текстура имеет специфический рельеф в виде замкнутых впадин, так называемых масляных карманов (МК). Наличие МК способствует удержанию объема смазки, улучшающего диссипативные характеристики поверхности трения, что способствует снижению интенсивности

изнашивания наносимого металлопокрытия⁴ [9].

Цель исследования – выбор электроискровых покрытий, обеспечивающих снижение интенсивности изнашивания рабочих поверхностей деталей механизма всасывания при ремонте тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Обзор литературы

На этапе выбора материала электрода для восстановления и обеспечения высоких триботехнических свойств, при разработке технологического процесса, применяется расчетно-экспериментальный метод, позволяющий определить соотношение интенсивностей изнашивания создаваемых покрытий с базовыми образцами.

Исследования показали, что расчетная интенсивность изнашивания при упругом контакте пар трения будет определяться по формуле:

$$I = K_2 \cdot \alpha \cdot K_{nv} \cdot p^{1 + \frac{t_y}{2\nu+1}} \times E^{\frac{2\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \Delta^{\frac{\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (1)$$

где K_2 – коэффициент, равный $K_2 = 0,5^{t_y-1} \cdot \frac{1}{2\nu} \cdot 2^{\frac{1}{2\nu}} \cdot K_1$; K_1 – коэффициент, зависящий от геометрии и высоты единичных неровностей на поверхностях твердых тел; α – коэффициент перекрытия, равный $\alpha = A_a / A_r$ (A_a – номинальная площадь контакта, A_r – фактическая площадь контакта); K_{nv} – поправочный коэффициент числа циклов до отделения частицы износа; t_y – показатель кривой фрикционной усталости при упругом контакте; ν – параметр формы опорной кривой; E – модуль упругости покрытия (модуль Юнга), кгс/см²;

p – эксплуатационная нагрузка в паре трения, кгс/см²; Δ – комплексная шероховатость поверхности; k – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте; σ_0 – разрушающее напряжение при однократном растяжении ($\sigma_0 = \sigma_2$), кгс/см². Более подробно эти данные представлены в работе Е. Г. Мартыновой⁵.

Во время работы тестоделительной машины происходит приработка деталей механизма всасывания друг к другу. При этом на поверхностях деталей устанавливается равновесная шероховатость, из-за чего влияние параметров микрогеометрии становится минимальным [10–12].

Тогда для приработанных поверхностей молекулярная составляющая коэффициента трения f_M будет определяться по формуле:

$$f_M = 1,4 \sqrt{\frac{\tau_0 \cdot \alpha_\Gamma}{E}} + \beta, \quad (2)$$

где τ_0 (кгс/см²) и β – фрикционные параметры покрытия; α_Γ – коэффициент гистерезисных потерь. Для нанесенного покрытия из сплавов Х15Н60 и бронзы БрОС10-10, $\alpha_\Gamma = 0,04$ [13].

Из выражения (2) следует, что коэффициент трения f_M для приработанных поверхностей практически не зависит от давления в паре трения и их микрогеометрических характеристик.

Устанавливаемая после приработки пар трения равновесная шероховатость поверхностей определяется по выражению [13]:

$$\Delta = \frac{15\tau_0^{5/4}}{E^{3/4} \cdot p^{1/2} \cdot \alpha_\Gamma^{5/4}}. \quad (3)$$

⁴ Мартынова Е. Г. Разработка технологии ремонта тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа с применением метода электроискровой обработки : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2022. 216 с. URL: https://mrsu.ru/upload/iblock/62c/sqfrimqncqyy1vpultaeykrtahn6h4/Dissertatsiya_Martynova-E.G_.pdf (дата обращения: 06.10.2022).

⁵ Там же.

Тогда формула расчета интенсивности изнашивания пар трения (1), имеющих упругий контакт в случае контактирования приработанных поверхностей, с учетом выражения (3), запишется:

$$I = K_2 \cdot 15^{\frac{2t_y}{5}} \cdot \alpha \cdot K_{iv} \cdot p \times \\ \times E^{\frac{t_y}{2}-1} \cdot \tau_0^{1/2} \cdot \frac{1}{\alpha_r^{1/2}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y} \quad (4)$$

Таким образом, при упругом виде контактного взаимодействия приработанных поверхностей на интенсивность изнашивания влияют механические, физические и фрикционные свойства поверхности изнашивающейся детали и молекулярная составляющая коэффициента трения.

В настоящее время в научной литературе имеется ограниченное количество публикаций, описывающих результаты экспериментальных исследований механических, физических и фрикционных свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки. Недостаточная изученность свойств покрытий объясняется низким уровнем апробации методик неразрушающего контроля применительно к электроискровым покрытиям.

В последние годы получен ряд ответов на вопросы трибологического материаловедения в области изучения свойств электроискровых металлопокрытий.

Представлены результаты исследования разрушающего напряжения при однократном растяжении σ_0 . Для этого по остаточному отпечатку, равному 1 мм, на глубине 0,1 мм от шарикового наконечника диаметром 2,5 мм фиксировалось

значение максимальной нагрузки. Затем по экспериментальным зависимостям находилось значение σ_0 . Расхождение результатов эталонных образцов по данной методике составило не более 5 %⁶.

Результаты оценки модуля упругости покрытия из сплава Х20Н80 методом инструментального индентирования, основанного на построении диаграммы зависимости нагрузки, приложенной к индентору от глубины его проникновения во время нагружения и разоружения, представлены в ряде работ⁷ [9]. Расхождение результатов эталонных образцов и покрытий из сплава Х20Н80 по данной методике составило не более 7 %.

Для определения фрикционных параметров электроискровых покрытий авторы работ использовали испытательную машину Hegewald & Peschke Inspekt table, обеспечивающую плавную нагрузку на образцы в диапазоне от 1 до 50 000 Н с погрешностью $\pm 0,5$ %⁸ [9]. Размеры полученных отпечатков измерялись с помощью современно измерительного оборудования профилографа – профилометра Form Talysurf фирмы Taylor Hobson. Расхождение результатов эталонных образцов по данной методике составило не более 4 %.

Таким образом, можно отметить, что имеющиеся и хорошо апробированные методы и средства измерения позволяют с высокой степенью достоверности определять физико-механические и фрикционные свойства электроискровых покрытий [14; 15].

Материалы и методы

Для расчета интенсивности изнашивания электроискровых покрытий

⁶ Оценка относительного удлинения покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2018. С. 377–381. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800128> (дата обращения: 01.05.2021).

⁷ Совершенствование методики определения модуля упругости материалов инструментальным индентированием / С. А. Величко [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. С. 335–341. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44318698> (дата обращения: 01.05.2021).

⁸ Там же.

по формуле (4) необходимо определить физические, механические и фрикционные свойства.

Для расчета интенсивности изнашивания электроискровых покрытий по формуле (4) наносимых на рабочие поверхности деталей ресурсопределяющего узла механизма всасывания необходимо определить физические, механические и фрикционные свойства [16; 17].

Расчет интенсивности изнашивания покрытий проведен при наибольшей эксплуатационной нагрузке, действующей на детали сопряжения «поршень – камера», равной 3,2 МПа.

Для проведения исследований по определению составляющих параметров на поверхность образцов, изготовленных из сплава ЧН19Х3Ш, были нанесены покрытия из хромоникелевого сплава марки Х15Н60 и оловянисто-свинцовистой бронзы марки БрОС10-10 методом электроискровой обработки на установке «БИГ-5» (фирма SCINTI, Молдова) в ручном режиме с количеством энергии 300 Дж, частотой импульсов 50 Гц, а также удельным временем обработки 27 с/см². Полученная толщина покрытия достаточна для компенсации износов поверхностей деталей механизма всасывания.

Параметр шероховатости R_a на участках основного профиля исследуемого электроискрового покрытия после механической обработки составляет не более 0,2 мкм по ГОСТ 2789-73.

Принятое количество образцов для каждого эксперимента при доверительной вероятности $\alpha_0 = 0,9$, относительной ошибке $\delta = 10\%$ и ожидаемом коэффициенте вариации $V = 0,1$ принято равным 8 шт. [16].

Для определения разрушающего напряжения при однократном растяжении (4) σ_0 были изготовлены образцы размером 15×15×10 мм. В поверхность

испытуемого образца на глубину 0,1 мм вдавливался шариковый наконечник диаметром 2,5 мм до получения остаточного отпечатка диаметром 1 мм⁹ [17]. При этом фиксируется максимальное значение нагрузки P_{\max} .

Затем рассчитывается максимальная твердость H_{\max} по уравнению:

$$H_{\max} = 1,32P_{\max}, \quad (5)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка, Н.

По экспериментальной зависимости, представленной в другой работе¹⁰, между максимальной твердостью H_{\max} и пределом прочности исследуемых покрытий σ_b находится значение σ_b .

Для проведения эксперимента используется испытательная машина Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН (рис. 2).

Для измерения диаметра отпечатков d в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью измерений $\pm 0,02$ мм использовался анализатор Siams 700, установленный на базу оптического микроскопа Olympus GX51. Повторность измерений на каждом образце составляла 5 вдавливаний.

Измерение модуля упругости покрытий проводится методом инструментального индентирования, основанного на построении диаграммы зависимости нагрузки, приложенной к индентору от глубины его проникновения, во время нагружения и разгрузки¹¹ [18; 19]. Общий вид диаграммы представлен на рисунке 3.

Для получения кривых 1 и 2 (рис. 3) в качестве нагрузочно-разгрузочного устройства используется машина Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН (рис. 4). Для эксперимента были изготовлены образцы размером 15×15×10 мм.

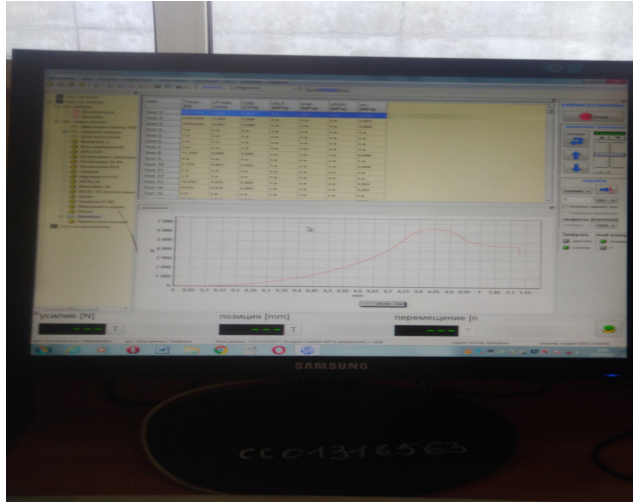
⁹ Оценка относительного удлинения покрытий...

¹⁰ Совершенствование методики определения модуля упругости...

¹¹ Там же.

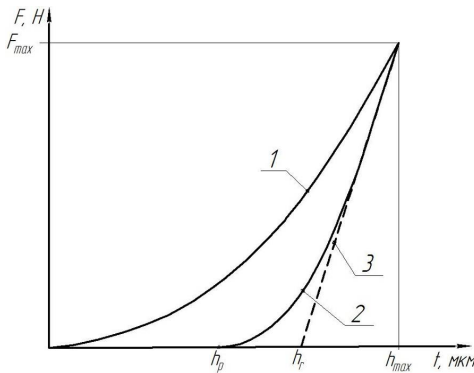


а)



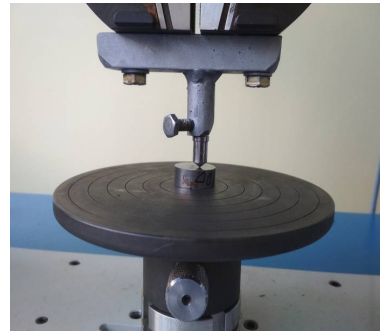
б)

Р и с. 2. Испытательная машина Hegewald & Peschke: а) общий вид; б) интерфейс машины
F i g. 2. Hegewald & Peschke testing machine: а) general view; б) machine interface



Р и с. 3. Зависимость нагрузки от глубины индентирования:
1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгружения;
3 – касательная к кривой разгружения 2; h_r – точка пересечения касательной 3 с осью перемещения; h_p – точка пересечения кривой разгружения 2 с осью перемещения; h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора

F i g. 3. Dependence of load on the indentation depth: 1 – loading curve; 2 – unloading curve; 3 – tangent to the unloading curve 2; h_r – point of intersection of tangent 3 with the axis of movement; h_p – point of intersection of the unloading curve 2 with the axis of movement; h_{max} – maximum depth of indenter introduction



Р и с. 4. Исследование модуля упругости на машине Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН
F i g. 4. Elastic modulus study with Hegewald & Peschke Inspekt table 50 kN

К подвижной (верхней) траверсе крепилось приспособление, в которое устанавливался алмазный индентор Викерса,

а на неподвижную (нижнюю) траверсу устанавливался испытуемый образец (рис. 4)¹² [18; 19].

¹² Там же.

При вдавливании алмазного индентора в поверхность образца фиксируется максимальное значение заданной нагрузки F_{\max} . Зависимость приложенной нагрузки к индентору от глубины его проникновения в поверхность испытуемого образца (линия 1 рис. 3) появляется автоматически на мониторе испытательной машины. При измерении индентор внедряется в испытуемую поверхность образца на минимальную глубину 50 мкм. Затем после выдержки индентора под нагрузкой в течение 15 с осуществляется полная разгрузка образца с получением графической зависимости (линия 2 рис. 3). По полученной линии 2 графически строится касательная линия 3 при нагрузке F_{\max} .

По данным литературных источников¹³ [20], модуль упругости при индентировании E_{IT} равен

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}}, \quad (6)$$

где v_s – коэффициент Пуассона испытуемого материала; v_i – коэффициент Пуассона индентора (для алмазного индентора $v_i = 0,07$); E_i – модуль упругости индентора (для алмазного индентора $E_i = 11,4 \cdot 10^5$ Н/мм²); E_r – приведенный модуль упругости в области индентирования, Н/мм².

Модуль упругости E_r в области индентирования равен

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C\sqrt{A_p}}, \quad (7)$$

где C – податливость в контакте индентора с испытуемым образцом;

A_p – площадь поперечного сечения поверхности в контакте (для индентора Виккерса $\sqrt{A_p} = 4,950h_c$, мкм²); h_c – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец.

Величина h_c вычисляется по формуле:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon (h_{\max} - h_r), \quad (8)$$

где h_{\max} – глубина, соответствующая максимальной нагрузке F_{\max} (рис. 3), мкм; ε – поправочный коэффициент (для индентора Виккерса $\varepsilon = 3/4$); h_r – точка пересечения касательной 3 с осью t , мкм (рис. 3).

Для определения податливости C (7) используется выражение:

$$C = \frac{dw}{dF} - \frac{dh_c}{dF}, \quad (9)$$

где $\frac{dw}{dF}$ – тангенс угла наклона линии начала разгрузки (определяется по касательной линии 3, рис. 3); $\frac{dh_c}{dF}$ – податливость прибора, равная величине обратной его жесткости¹⁴ [20].

Так как жесткость рамы испытательной машины Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН составляет $1,23 \cdot 10^3$ Н/мм, то податливость рамы, определяемая по формуле (9), будет равна $80,6 \cdot 10^{-7}$ мм/Н. При изменении конструкции верхней траверсы машины (рис. 4) общая жесткость снизилась, а податливость увеличилась до значения $26,7 \cdot 10^{-6}$ мм/Н.

Определение фрикционных параметров τ_0 и β взаимодействия двух твердых тел осуществляется по ГОСТ 27640-88.

Для их определения используется способ, заключающийся в относительном движении деформированных поверхностных слоев с пренебрежимо малой величиной сопротивления.

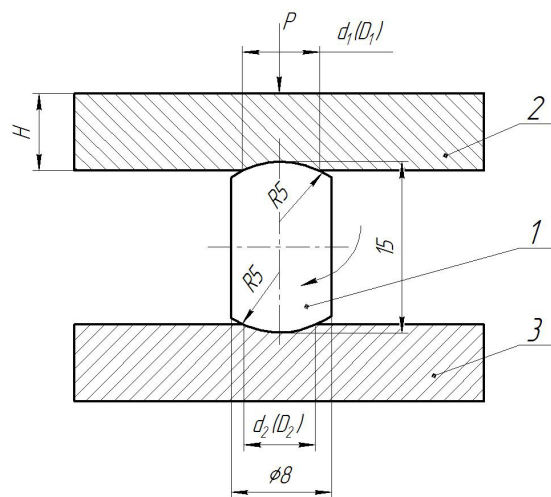
¹³ Sosnovskiy L. A., Makhutov N. A., Troshchenko V. T. Evolution of Ideas on Fatigue of Metals by Volume Loading and Friction // VI Междунар. симпозиум по трибофатике МСТФ 2010. Минск, 2010. С. 77–84. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41104417> (дата обращения: 01.05.2021).

¹⁴ Там же.

Это достигается, если индентор *I* (рис. 5), изготовленный в виде сферы, сдавливать между двумя плоскопараллельными образцами 2 и 3 нормальной силой *P*. После приложения силы индентор необходимо вращать¹⁵ [20].

Для реализации эксперимента разработано устройство, смонтированное на испытательной машине Hegewald & Peschke 50 кН, которая обеспечивает плавную нагрузку на образцы с точностью до 1 Н. Общий вид устройства представлен на рисунке 6.

Особенностью устройства является создание точной нагрузки на образцы с погрешностью $\pm 0,5\%$ в диапазоне от 1 до 50 000 Н, а также измерение момента трения с погрешностью $\pm 5\%$ в интервале от 0,1 до 20 Н·м. Все результаты по значениям нагрузки и моменту трения автоматически передаются на ПК сбора данных.



Р и с. 5. Схема определения фрикционных параметров τ_0 и β : 1 – вращающийся образец; 2, 3 – плоские контрообразцы; d_1, d_2 – диаметры отпечатков верхнего контрообразца; D_1, D_2 – диаметры отпечатков нижнего контрообразца

Fig. 5. Scheme for determining the friction parameters τ_0 and β : 1 – rotating sample; 2, 3 – flat test pieces; d_1, d_2 – diameters of the upper test piece imprints; D_1, D_2 – diameters of the lower test piece imprints

Вращающийся образец выполнен из стали ШХ15 диаметром 15 мм, а плоские контрообразцы – размером $15 \times 15 \times 10$ мм.

При проведении испытаний образец устанавливается относительно края контрообразца на расстоянии не менее 10 мм.

Затем к верхнему контрообразцу в два этапа прикладывается нагрузка. На первом этапе нагрузка должна быть такой, чтобы остались отпечатки диаметром 1–2 мм на контрообразцах.

После выдержки образцов и контрообразцов этой нагрузке в течение 3–6 с проводится вращение образца с частотой 2 об/мин. При повороте на $30\text{--}60^\circ$ и до углового перемещения на 90° непрерывно регистрируется значение момента сил трения *m*. После этого нагрузка снимается, а образец и контрообразцы смещаются друг относительно друга на расстояние не менее 15 мм до другого



Р и с. 6. Общий вид устройства для определения фрикционных параметров пар трения

Fig. 6. General view of the device for determining the friction parameters of friction pairs

¹⁵ Там же.

центра отпечатка. Нагрузка при втором нагружении отличается на 15–20 %.

После испытаний образцы снимаются с испытательной установки, обезжириваются, а затем на верхнем и нижнем контрообразце измеряются диаметры отпечатков в двух взаимно перпендикулярных направлениях при первом и втором нагружении с помощью профилографа-профилометра Form Talysurf фирмы Taylor Hobson.

Для измеренных диаметров отпечатков находятся их среднее значение отдельно для верхнего и нижнего контрообразцов:

$$d = \frac{(d_1^0 + d_1^{90}) + (d_2^0 + d_2^{90})}{4},$$

$$D = \frac{(D_1^0 + D_1^{90}) + (D_2^0 + D_2^{90})}{4},$$

где d_1 , D_1 и d_2 , D_2 – диаметры отпечатков на первом и втором контрообразцах соответственно при первом и втором нагружении, мм.

Полученные значения диаметров отпечатков d , D и соответствующие им величины моментов сил трения m и M используются для определения фрикционных параметров τ_0 и β по формулам

$$\tau_0 = \frac{0,75}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \cdot \left(\frac{m\sigma_2}{(0,5d)^3} - \frac{M\sigma_1}{(0,5D)^3} \right),$$

$$\beta = \frac{0,75}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \cdot \left(\frac{M}{(0,5D)^3} - \frac{m}{(0,5d)^3} \right),$$

где $\sigma_1 = \frac{4P_1}{\pi d^2}$, $\sigma_2 = \frac{4P_2}{\pi D^2}$ – средние величины нормальных контактных напряжений при первом и втором нагружениях соответственно, МПа.

Известно, что сопротивление разрушению при контактом взаимодействии

пар трения, характеризуется кривой фрикционной усталости (кривая Велера). Кривая Велера показывает зависимость усилия, приложенного к поверхности материала F , от числа циклов его повторения n до предельного разрушения материала поверхностного слоя [20].

Испытания поверхностной усталости образцов на фрикционную усталость проведены на трибометре TRB-S-DE (рис. 7).

Для проведения исследований были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 20 мм и толщиной 10 мм. В качестве индентора использовался стальной шарик марки ШХ15 диаметром 3 мм.

Скорость вращения образца задается при условии отсутствия нагрева в паре трения ($9 \cdot 10^{-3}$ м/сек) и автоматически поддерживалась в процессе всего испытания [21].

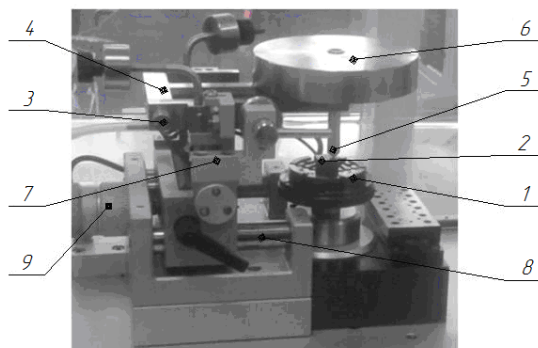
Нагрузка, действующая на индентор, подбирается таким образом, чтобы отсутствовал процесс резания. После определения количества циклов до отделения частиц с поверхности материала по скачку коэффициента трения и образованию усталостных трещин на бороздке нагрузка снижается на 15–20 % и эксперимент повторяется до получения координат второй точки.

По координатам двух точек строится график зависимости количества циклов от величины действующей нагрузки (рис. 8).

Затем с использованием программы «Компас-3D» определяется угол наклона построенной прямой к оси n_e . Найденный угол наклона используется для определения коэффициента фрикционной усталости t_y по формуле:

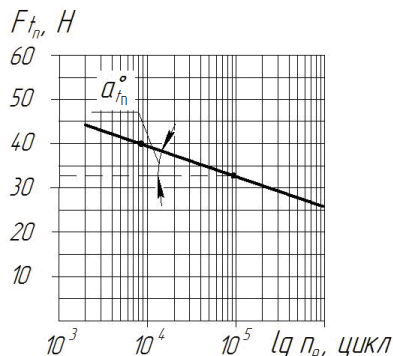
$$t_y = \text{ctg} \alpha_{t_y}. \quad (10)$$

Триботехнические испытания образцов пар трения без покрытий и обработанных методом электроискровой обработки проводили на модернизированной



Р и с. 7. Общий вид трибометра TRB-S-DE: 1 – столик с вращательным движением; 2 – образец; 3 – ось; 4 – подвижная стойка; 5 – индентор; 7 – корпус; 8 – направляющие; 9 – микрометрический винт

Fig. 7. General view of the TRB-S-DE tribometer: 1 – table with a rotational motion; 2 – sample; 3 – axis; 4 – sliding bar; 5 – indenter; 7 – body; 8 – guides; 9 – micrometer screw



Р и с. 8. График зависимости F_{t_n} от n_e
Fig. 8. The graph of the dependence of F_{t_n} on n_e

машине трения СМТ-1М по типу «ко- лодка – ролик» [22]. Машина трения СМТ-1М позволяет автоматически снимать комплекс триботехнических параметров.

Материал и размеры образцов, принятые для испытаний, представлены в таблице 2.

Триботехнические параметры, такие как максимальная нагрузка до предзадира, коэффициент и момент трения, интенсивность изнашивания для базовой пары трения (табл. 2), определялись по ГОСТ 23.224-86.

Для остальных образцов определялась только интенсивность изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа. Время стационарных испытаний составляло 8 ч.

Образцы прирабатывались друг к другу до площади прилегания не менее 90 %. Она контролировалась методом планиметрирования пятен контакта с погрешностью не более 1 %. После этого образцы маркировались, промывались в ацетоне, высушивались и взвешивались.

Подготовленные образцы устанавливали на машину трения и приводили в движение подвижный образец

с частотой 300 об/мин (скорость скольжения пары трения 0,8 м/с). Использовали смазочный материал (масло промышленное И-20А) по ГОСТ 20779-75, подача смазки разовая в картер.

После каждого вида испытаний образцы промывались в ацетоне, просушивались, а затем взвешивались на аналитических весах с точностью измерения до 0,00001 г с трехкратной повторностью.

Интенсивность изнашивания образцов определялась по формуле:

$$I = \frac{W}{L}, \quad (11)$$

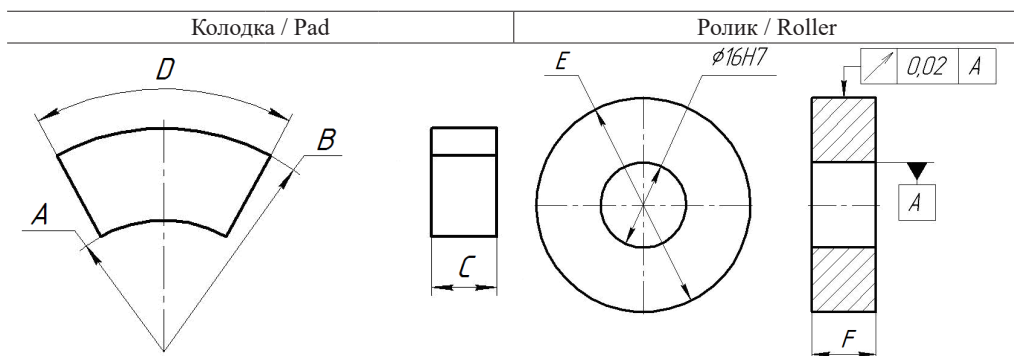
где W – линейный износ образца за пройденный путь, м; L – пройденный путь трения образца за время испытаний, м.

Линейный износ образцов определялся по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (12)$$

где ΔG – изменение массы образца от начала до конца испытаний, кг; γ – плотность испытуемого материала, кг/м³; F_c – контурная площадь контакта образцов, м².

Параметры образцов для триботехнических испытаний
Parameters of samples for tribotechnical tests



Размеры, мм / Dimensions, mm

A	B	C	D	E	F
25	34	10	45°	50	12
чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + бронза БрОС10-10 / cast iron ChN19Kh3Sh + bronze BrOS10-10				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + сплав Х15Н60 / cast iron ChN19Kh3Sh + alloy Kh15N60				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + сплав Х15Н60 + MODENGY ПТФЭ-А20 / cast iron ChN19Kh3Sh + alloy Kh15N60 + MODENGY PTFE-A20				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	

Пройденный путь трения образца за время испытаний [22]:

$$L = N \cdot l, \quad (13)$$

где l – линейный размер поверхности трения сопряженного образца, м; N – число циклов за время прохождения пути l .

Для пары трения интенсивность изнашивания I_z определяется как сумма интенсивностей изнашивания колодки и ролика.

Результаты исследования

Проведенные триботехнические испытания образцов пар трения «колодка – ролик», выполненных из материала деталей механизма всасывания (чугун ЧН19Х3Ш), показали, что суммарная интенсивность изнашивания при эксплуатационной нагрузке в паре трения 3,2 МПа составила

$18 \cdot 10^{-12}$, что относится ко 2-му классу износостойкости [9; 14]. Таким образом, пара трения «колодка – ролик», выполненная из высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш, имеет упругий вид контактного взаимодействия поверхностей [9].

Полученные результаты физических, механических, фрикционных параметров и расчетных значений интенсивности изнашивания электроискровых покрытий представлены в таблице 3.

Согласно представленным в таблице 3 результатам расчетного и экспериментального исследования интенсивность изнашивания высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш с электроискровым покрытием из бронзы БрОС10-10 в 1,461 раза ниже базового образца, а с электроискровым покрытием из сплава Х15Н60 – ниже в 1,31 раза.

**Результаты физических, механических, фрикционных параметров
и расчетных значений интенсивности изнашивания**
Results of physical, mechanical, friction parameters and calculated values of wear rate

Материал покрытия / Coating material	Коэффициенты / Coefficients					ν	p , кгс/см ² / p , kgf/cm ²	Определяемые параметры / Defined parameters					Интен- сивность изнаши- вания, $I \times 10^{-12}$ / Wear rate, $I \times 10^{-12}$	
	$K_2 \times 10^{-2}$	K_n	α	α_r	k			фрикционные / frictional		физи- ческие / physical	механи- ческие / mecha- nical	$I_{\text{теор}}$	$I_{\text{эк}}$	
								t_y	τ_0 , кгс/см ² / τ_0 , kgf/cm ²					β
Бронза BrOS10-10 / Bronze BrOS10-10	1,14	2,3	1,11	0,04	3	1,5	32	5,8	172	0,021	1 140 000	3 820	4,62	
Сплав X15N60 / Alloy Kh15N60	1,22	2,2	1,11	0,04	3	1,5	32	5,7	175	0,023	1 680 000	4 740	5,23	6,8

Таким образом, исследуемые материалы обладают высокими антифрикционными свойствами и их целесообразно использовать для восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей.

В таблице 4 представлены результаты триботехнических характеристик колодки и ролика, изготовленных из высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш базовых образцов, полученных по ГОСТ 23.224-86.

Статистические характеристики параметров выборок трибосопряжений базовых образцов
Statistical characteristics of the sample parameters of the tribocouple base samples

Триботехнические параметры / Tribotechnical parameters	Среднее значение \bar{X} / Average value \bar{X}	Значения 95-процентного интервала варьирования / Values of the 95 percent variation interval		Уровень значимости критерия p_w / Significance level of the criterion p_w	Стандартное отклонение σ / Standard deviation σ
		нижнее / lower	верхнее / top		
пара трения 1: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка – чугун ЧН19Х3Ш ($N = 8$) / friction pair 1: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh ($N = 8$)					
1	2	3	4	5	6
Максимальное давление в паре трения $P_{\text{МП}}$, МПа / Maximum pressure in the friction pair $P_{\text{МП}}$, МПа	20,1	18,2	23,9	0,4633	5,26

Окончание таблицы 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6
Оптимальное давление в паре трения $P_{оп}$, МПа / Optimal pressure in the friction pair $P_{оп}$, МПа	14	13,1	18,3	0,6751	2,16
Минимальный коэффициент трения при $P_{оп} = 14$ МПа f_{min} / Minimum coefficient of friction at $P_{оп} = 14$ МПа f_{min}	0,0131	0,0082	0,022	0,8842	0,004
Интенсивность изнашивания колодки при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа I_k / Rate of pad wear under load $P_{оп} = 14$ МПа I_k	$18 \cdot 10^{-12}$	$8,37 \cdot 10^{-12}$	$23,2 \cdot 10^{-12}$	0,6752	$1,59 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа I_p / Rate of roller wear under load $P_{оп} = 14$ МПа I_p	$14 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$19,1 \cdot 10^{-12}$	0,3927	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа ΣI / Total intensity of wear under load $P_{оп} = 14$ МПа ΣI	$32 \cdot 10^{-12}$	$11,5 \cdot 10^{-12}$	$52,6 \cdot 10^{-12}$	0,3426	$6,3 \cdot 10^{-12}$
Фактор износа Φ / Wear factor Φ	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$0,82 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$	0,4230	$0,45 \cdot 10^{-12}$

Из таблицы 4 видно, что интенсивность изнашивания колодки в 1,28 раза больше интенсивности изнашивания ролика, следовательно, в паре трения колодка является изнашивающейся поверхностью, а ролик – изнашиваемой поверхностью, поэтому

электроискровое покрытие наносилось на поверхность колодки.

Результаты экспериментальной оценки интенсивности изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа представлены в таблице 5 [22].

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Результаты экспериментальной оценки интенсивности изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа

Results of experimental evaluation of wear rate at a load of 3.2 MPa in the friction pair

Триботехнические параметры / Tribotechnical parameters	Среднее значение \bar{X} / Average value \bar{X}	Значения 95-процентного интервала варьирования / Values of the 95 percent variation interval		Уровень значимости критерия p_w / The significance level of the criterion p_w	Стандартное отклонение σ / Standard deviation σ
		нижнее / lower	верхнее / top		
пара трения 1: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка – чугун ЧН19Х3Ш ($N = 8$) / friction pair 1: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh ($N = 8$)					
1	2	3	4	5	6
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-12}$	0,5198	$1,8 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	0,3255	$1,7 \cdot 10^{-12}$

Окончание таблицы 5 / End of table 5

1	2	3	4	5	6
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$12 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-12}$	$18,7 \cdot 10^{-12}$	0,6188	$4,6 \cdot 10^{-12}$
пара трения 2: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из бронзы БрОС10-10 / friction pair 2: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosark alloying bronze BrOS10-10					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	0,5532	$1,06 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$4,77 \cdot 10^{-12}$	0,6784	$0,84 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$8,3 \cdot 10^{-12}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$	$10,97 \cdot 10^{-12}$	0,5421	$1,9 \cdot 10^{-12}$
пара трения 3: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из сплава X15H60 / friction pair 3: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosark alloying bronze BrOS10-10					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$5,1 \cdot 10^{-12}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	0,4373	$1,41 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$9,7 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$12,8 \cdot 10^{-12}$	0,1564	$2,8 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$15 \cdot 10^{-12}$	$8,8 \cdot 10^{-12}$	$24 \cdot 10^{-12}$	0,1319	$0,5 \cdot 10^{-12}$
пара трения 4: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из сплава X15H60 с антифрикционным твердосмазочным покрытием MODENGY / friction pair 4: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosark alloying Ch15N60 with MODENGY antifriction solid-lubricant coating					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$7,4 \cdot 10^{-12}$	0,6131	$1,45 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$3,1 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	$4,62 \cdot 10^{-12}$	0,8572	$0,97 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$8,7 \cdot 10^{-12}$	$7,4 \cdot 10^{-12}$	$9,7 \cdot 10^{-12}$	0,8234	$0,7 \cdot 10^{-12}$

Расчетные и экспериментальные значения интенсивности изнашивания изнашивающихся образцов представлены на рисунке 9.

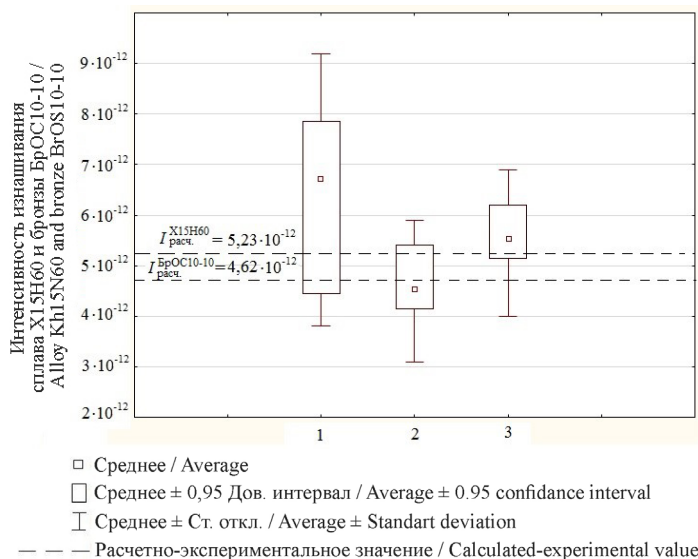
Из рисунка 9 видно, что все теоретические (расчетные) значения интенсивности изнашивания попадают в диапазоне 95-процентного доверительного интервала экспериментальных значений. Полученные результаты показывают высокую степень достоверности выбора электродных материалов с использованием апробированных методик определения параметров

и расчетно-экспериментальной оценки интенсивности изнашивания.

Обсуждение и заключение

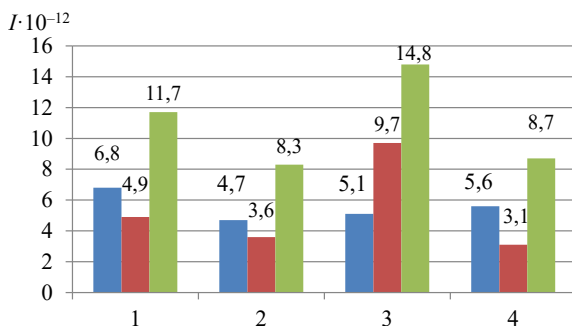
Проведенные в работе триботехнические испытания показали, что интенсивность изнашивания колодки после нанесения покрытия из оловянисто-свинцовой бронзы марки БрОС10-10 становится ниже, чем для базовой пары трения в 1,45 раза. При этом интенсивность изнашивания ролика уменьшилась в 1,36 раза. Таким образом, суммарная интенсивность изнашивания уменьшилась в 1,4 раза (рис. 10)¹⁶ [14].

¹⁶ Мартынова Е. Г. Разработка технологии ремонта тестоделительных машин...



Р и с. 9. Расчетные и эксплуатационные значения интенсивности изнашивания изнашивающихся образцов из высоколегированного чугуна ЧН15Х3Ш: 1 – без покрытия; 2 – после ЭИО электродом из бронзы BrOC10-10; 3 – после ЭИО электродом из сплава Х15Н60

F i g. 9. Calculated and operational values of the wear rate of highly alloyed ChN19Kh3Sh cast iron wear samples: 1 – uncoated; 2 – after elektrosark alloying with bronze BrOS10-10; 3 – after elektrosark alloying with alloy Kh15N60



Р и с. 10. Интенсивность изнашивания пар трения: 1 – колодка ЧН19Х3Ш, ролик ЧН19Х3Ш; 2 – колодка ЧН19Х3Ш+BrOC10-10ЭИО, ролик ЧН19Х3Ш; 3 – колодка ЧН19Х3Ш+Х15Н60ЭИО, ролик ЧН19Х3Ш; 4 – колодка ЧН19Х3Ш+Х15Н60ЭИОМОДЕНГУ, ролик ЧН19Х3Ш; синий – интенсивность изнашивания колодки; красный – интенсивность изнашивания ролика; зеленый – суммарная интенсивность изнашивания

F i g. 10. Wear rate of friction pairs: 1 – pad ChN19Kh3Sh, roller ChN19Kh3Sh; 2 – pad ChN19Kh3Sh+BrOS10-10ESP, roller ChN19Kh3Sh; 3 – pad ChN19Kh3Sh+Kh15N60ESP, roller ChN19Kh3Sh; 4 – pad ChN19Kh3Sh+Kh15N60ESPMODENGY, roller ChN19Kh3Sh; blue – pad wear rate; red – roller wear rate; green – total wear rate

Интенсивность изнашивания колодки после нанесения покрытия из хромоникелевого сплава Х15Н60 уменьшается по отношению к базовой паре трения в 1,33 раза. При этом

интенсивность изнашивания ролика увеличивается в 1,97 раза. Таким образом, суммарная интенсивность изнашивания увеличивается в 1,26 раза (рис. 10).

Для снижения истирающей способности электроискрового покрытия из сплава Х15Н60 необходимо повысить его антифрикционные свойства, используя после ЭИО твердосмазочное покрытие на основе политетрафторэтилена компании «Моделирование и инжиниринг».

Проведенные в работе [14] исследования показали, что «интенсивность изнашивания колодки уменьшилась в 1,21 раза относительно базовой пары трения, а интенсивность изнашивания ролика уменьшилась в 1,58 раза. Таким

образом, суммарная интенсивность изнашивания уменьшилась в 1,34 раза»¹⁷.

Следовательно, электроискровые покрытия из оловянисто-свинцовой бронзы БрОС10–10 и сплава Х15Н60 обладают высокими триботехническими свойствами.

Полученные результаты исследований коррелируют с результатами других авторов и имеют практическую значимость для предприятий технического сервиса, занимающихся ремонтом тестоделительных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арабей Е. В., Балабанов В. Н. Характеристика оборудования для формования и разделки теста // Вестник современных исследований. 2017. № 5-1. С. 120–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29345309> (дата обращения: 06.10.2022).
2. Алексеев Г. В., Громцев А. С., Лей А. Г. Экспериментальное уточнение условий повышения точности дозирования жидкостей // Техника машиностроения. 2016. Т. 23, № 3. С. 57–63 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539434> (дата обращения: 06.10.2022).
3. Ivanov V. I., Burumkulov F. K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010. Vol. 46, Issue 5. P. 416–423. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>
4. Formation of Thick Electrospark Coatings with Increased Contact Continuity / S. A. Velichko [et al.] // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41, Issue 7. P. 657–660. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21070248>
5. Влияние молибдена на структуру и свойства электроосажденных сплавов железа и никеля / И. М. Ковенский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 6. С. 134–143. doi: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-6-134-143>
6. Дорогой В. Н., Михлин В. М. Использование нового ресурсосберегающего метода для обслуживания деталей машин // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2014. № 1. С. 69–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (дата обращения: 06.10.2022).
7. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings / S. N. Grigorev [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34, Issue 3. P. 161–165. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>
8. Ремонт тестоделительных устройств вакуумного типа методом электроискровой наплавки / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Хлебопечение России. 2004. № 2. С. 34–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19069614> (дата обращения: 06.10.2022).
9. Velichko S. A., Martynov A. V., Kolomeichenko A. V. Surface Profile Formed by Electric Discharge Machining // Russ. Engin. Res. 2019. Vol. 39. P. 982–985. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19110182>
10. Определение модуля упругости электроискровых покрытий инструментальным индентированием / С. А. Величко [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 91–97. doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_1_91

¹⁷ Там же.

11. Сивцов В. Н. Применение электроискровой обработки и клея-компаунда для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей машин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2021. № 37. С. 23–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46223224> (дата обращения: 06.10.2022).
12. Сивцов В. Н. Восстановление ресурсных деталей машин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2016. № 22. С. 21–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29154929> (дата обращения: 06.10.2022).
13. Ильин К. А. Влияние шероховатости поверхности на триботехнические показатели поверхностей // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. 2019. Т. 2, № 9. С. 1103–1106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42391481> (дата обращения: 06.10.2022).
14. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 302–320. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
15. Величко С. А., Мартынова Е. Г., Иванов В. И. Оценка предельного состояния тестодетельных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 448–463. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>
16. Стопалов С. Надежность тракторов. Сбор и обработка информации для оценки надежности в реальной эксплуатации // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2011. № 12. С. 27–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22598156> (дата обращения: 06.10.2022).
17. Вовк Л. П. К определению комплекса механических характеристик неоднородных материалов ударным вдавливанием индентора // Заводская лаборатория. 2003. № 1. С. 45–48.
18. Булычев С. И., Калмакова А. В., Кравченко А. Н. Определение модуля Юнга по твердости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75, № 9. С. 63–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (дата обращения: 01.05.2021).
19. Богодухов С. И., Гарипов В. С., Солосина Е. В. Определение модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 4. С. 289–294. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21638519> (дата обращения: 01.05.2021).
20. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method / V. O. Startsev [et al.] // Polymer Science. Series D. 2017. Vol. 10, Issue 4. P. 313–317. doi: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
21. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 218–233. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
22. Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr-Al₂O₃ / А. Д. Сытченко [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. №. 2. С. 73–79. doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>

Поступила 08.10.2022; одобрена после рецензирования 02.12.2022; принята к публикации 15.12.2022

Об авторах:

Величко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, Researcher ID: G-9021-2018, velichko2005@yandex.ru

Мартынов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, Researcher ID: AAR-8786-2020, martynov-230685@yandex.ru

Мартынова Елена Геннадьевна, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, Researcher ID: C-5023-2019, el.mart2012@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С. А. Величко – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

А. В. Мартынов – составление плана статьи и ее написание.

Е. Г. Мартынова – экспериментальные исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Arabey E.V., Balabanov V.N. Characteristics of Equipment for Forming and Cutting Dough. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2017;(5-1):120–123. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29345309> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Alexeev G.V., Gromcev A.S., Leu A.G. Experimental Revision of the Conditions of Increasing to Accuracy Dozirovaniya Liquids. *Tekhnika mashinostroeniya*. 2016;23(3):57–63 Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539434> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Ivanov V.I., Burumkulov F.K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010;46(5):416–423. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>
4. Velichko S.A., Kravchenko I.N., Martynov A.V., Martynova E.G. Formation of Thick Electrospark Coatings with Increased Contact Continuity. *Russian Engineering Research*. 2021;41(7):657–660. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21070248>
5. Kovenskiy I.M., Koreshkova E.V., Kulemina A.A., Chaugarova L.Z. Effect of Molybdenum on the Structure and Properties of Electrodeposited Alloys of Iron and Nickel. *Oil and Gas Studies*. 2021;(6):134–143. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-6-134-143>
6. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Use of a New Resource-Saving Method for Service of Details of Machines. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaystvo*. 2014;(1):69–72. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Grigor'ev S.N., Kovalev O.B., Kuzmin V.I., et al. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings. *Journal of Friction and Wear*. 2013;34(3):161–165. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>
8. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Molodykh A.V., Yevsyeyev P.N. [Repair of Vacuum-Type Dough Dividers by Electrospark Surfacing]. *Khlebopechenie Rossii*. 2004;(2):34–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19069614> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)
9. Velichko S.A., Martynov A.V., Kolomeichenko A.V. Surface Profile Formed by Electric Discharge Machining. *Russ. Engin. Res*. 2019;39:982–985. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19110182>
10. Velichko S.A., Kravchenko I.N., Chumakov P.V., et al. Determination of the Elastic Modulus of Electric Spark Coatings by Instrumental Indentation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;(1):91–97. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_1_91
11. Sivtsov V.N. The Use of Electric Spacing and Glue Compound to Restore the Seating Holes of Cabinet Parts of Machines. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2021;(37):23–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46223224> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Sivtsov V.N. Restoration of Resource Machine Details. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2016;(22):21–25. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29154929> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

13. Ilin K.A. [Influence of Surface Roughness on Tribotechnical Parameters of Surfaces]. *Nauchnye trudy studentov Izhevskoy GSKhA*. 2019;2(9):1103–1106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42391481> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)
14. Verkhoturav A. D., Ivanov V. I., Dorokhov A. S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):302–320. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
15. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):448–463. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>
16. Stopalov S. [Tractor Reliability. Gathering and Processing Information to Assess Reliability in Real Operation]. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2011;(12):27–35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22598156> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)
17. Vovk L.P. [To Determine the Complex Mechanical Characteristics of Heterogeneous Materials by Indentation Impact]. *Zavodskaya laboratoriya*. 2003;(1):45–48. (In Russ.)
18. Bulychev S.I., Kalmazkova A.V., Kravchenkov A.N. Determination of Young's Modulus from Hardness. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2009;75(9):63–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Bogoduhov S.I., Garipov V.S., Salosina E.V. The Elasticity Modulus of Various Materials by Means of Strain Gauges. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;(4):289–294. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21638519> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., et al. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method. *Polymer Science. Series D*. 2017;10(4):313–317. doi: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
21. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):218–233. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
22. Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Tribological Characteristics and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by Electrospark Alloying, Pulsed Cathodic Arc Evaporation and Hybrid Technology Using TiCNiCr and TiCNiCr—Dy2O3 Electrodes. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2020;(2):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>

Submitted 08.10.2022; revised 02.12.2022; accepted 15.12.2022

About the authors:

Sergey A. Velichko, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Technical Service Machines Chair, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, Researcher ID: G-9021-2018, velichko2005@yandex.ru

Alexei V. Martynov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Technical Service Machines Chair, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, Researcher ID: AAR-8786-2020, martynov-230685@yandex.ru

Elena G. Martynova, Lecturer of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, Researcher ID: C-5023-2019, el.mart2012@yandex.ru

Authors contribution:

S. A. Velichko – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

A. V. Martynov – article drafting and writing.

E. G. Martynova – experimental studies.

All authors have read and approved the final manuscript.