

Акулович Л.М.,
Миранович А.В.

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь, (8017) 267 17 84,
E-mail: dekanatfts@yandex.ru,
miron23@tut.by

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

УДК 621.791.92 : 621.81

В статье рассматриваются вопросы нанесения износостойких покрытий на металлические поверхности деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники с использованием энергий электрического и магнитного полей.

Ключевые слова: магнитно-электрическое упрочнение, электромагнитная система, композиционный ферромагнитный порошок, износостойкость, интенсивность изнашивания.

Одной из основных причин выхода из строя деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники является износ их поверхностей до 0,6 мм, причем около 50% крупногабаритных деталей отбраковывают из-за износа их поверхностей до 0,1 мм (например, валы двигателей, коробок перемены передач, задних мостов энергонасыщенных тракторов и грузовых автомобилей) [1]. Изношенные поверхности большинства таких деталей могут быть восстановлены применением современных технологий, к числу которых относятся способы упрочнения и восстановления, основанные на использовании концентрированных потоков электрической и магнитной энергий. К их числу относится и магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП), обладающее такими достоинствами, как отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом детали. Тем не менее, значительным недостатком магнитно-электрического упрочнения является неравномерность и неоднородность покрытия по толщине, что не позволяет использовать МЭУ для восстановления геометрических размеров поверхностей, износ которых составляет более 0,15 мм [2].

Для устранения вышеперечисленных недостатков ранее были проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на интенсификацию процесса упрочнения посредством разработки специальной электромагнитной системы (ЭМС) на основе постоянных магнитов (ПМ), обеспечивающей синхронизацию воздействий электрическими разрядами и внешним электромагнитным полем (ЭМП) на частицы ФМП и упрочняемую поверхность в рабочей зоне устройств МЭУ [3, 4]. Определено, что наибольшую стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивают ПМ из сплава ЮНДК24Т ГОСТ 17809-72 с величиной магнитной индукции $B=0,7$ Тл при рабочем зазоре 2,0 мм, ширине полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата $\alpha=12^\circ$ [4, 5]. В качестве источника технологического тока принят инверторный источник питания модели Invertec V270 T, обеспечивающий требуемую частоту, скважность пульсаций технологического тока и минимальную нестабильность процесса МЭУ [5].

Для реализации процесса магнитно-электрического упрочнения разработана и изготовлена установка модели УНП-1 (рис. 1), которая обеспечивает стабилизированные во времени технологические параметры режима нанесения износостойких покрытий [3, 5].

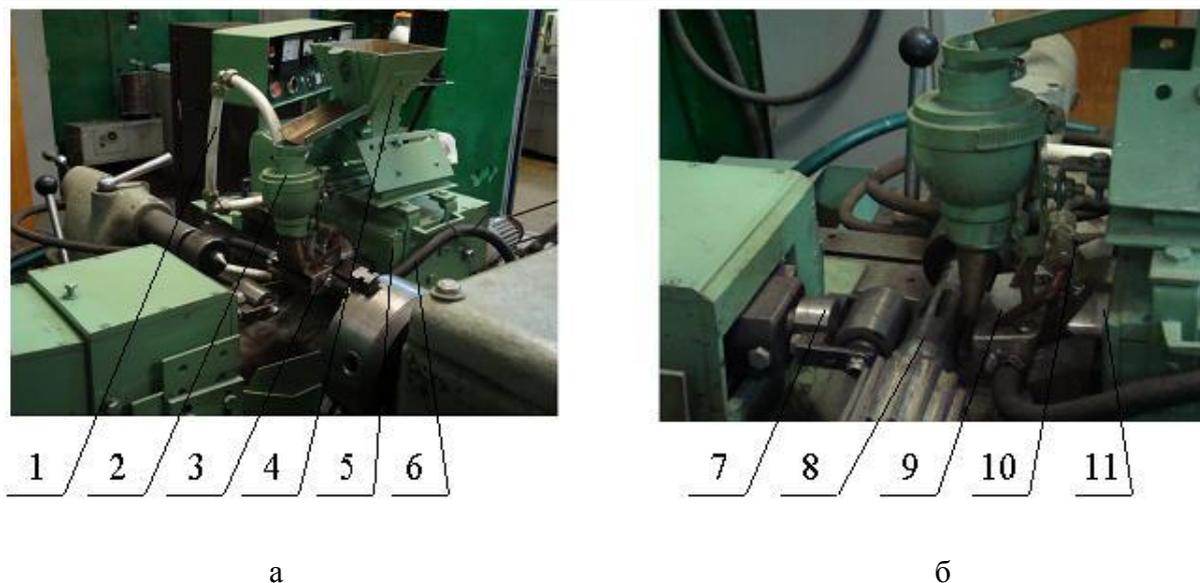


Рис. 1. Фотографии установки МЭУ модели УНП 1: 1 – трубопровод для подачи рабочей жидкости; 2 – смеситель; 3 – полюсный наконечник; 4 – бункер-дозатор; 5 – электромагнитный питатель; 6 – трубопровод для подачи охлаждающей жидкости наконечника; 7 – накатное устройство; 8 – деталь; 9 – сопло; 10 – трубопровод для отвода охлаждающей жидкости; 11 – сердечник магнита постоянного

Известно [4, 6, 7], что на структуру наплавленного металла, соответственно, и на эксплуатационные свойства поверхностей оказывает влияние не только химический и фазовый составы материалов ФМП, но и технологические параметры МЭУ покрытий. Так, при изменении режима магнитно-электрического упрочнения меняются условия формирования покрытий, геометрические характеристики и химическая неоднородность нанесенного материала.

Следует отметить, что процесс изнашивания различных материалов покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле, в условиях трения скольжения и качения с проскальзыванием со смазкой и смазкой, загрязненной частицами абразива не исследован. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния стабилизированных технологических параметров магнитно-электрического упрочнения на износостойкость покрытий из порошков различных составов.

Покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа Fe-2%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849 – 86) и высокоуглеродистого порошкового сплава ФБХ 6-2 (ГОСТ 11546 – 75) наносили на цилиндрические нормализованные образцы из стали 45 ГОСТ 1050 – 88 с наружным диаметром 40 мм и высотой 12 мм на установке модели УНП-1. Режим нанесения покрытий варьировался в зависимости от материала используемого ФМП в следующих пределах: плотность разрядного тока i – 1,9 А/мм²; подача ФМП q – от 0,32 до 0,39 г/с·мм²; окружная скорость заготовки V – от 0,05 до 0,07 м/с; магнитная индукция в рабочем зазоре B – 0,7 Тл; скорость подачи S – от 0,18 до 0,22 мм/об; расход рабочей жидкости q – от 2,86 до $2,95 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²). Механическая обработка образцов с покрытиями производилась шлифованием на станке модели ЗБ12 кругами карбида кремния зеленого зернистостью 16–25.

Триботехнические испытания образцов с покрытиями проводились на машине трения модели 2070 СМТ-1 в соответствии с ГОСТ 30480-97 и ГОСТ 23.224-86 в условиях изнашивания со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива при трении скольжения по схеме «диск-колодка» (контртело из чугуна ХТВ ГОСТ 3185-74, смазочный материал – масло промышленное И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4-87) и при трении качения с 10 %-м проскальзыванием по схеме «диск-диск» (контртело

из стали ШХ15 ГОСТ 801-78, подвергнутой закалке в камерной печи и отпуску до твердости 60–62 HRC, смазочный материал – масло трансмиссионное ТМ-3-18 (ТАП-15В) ГОСТ 23652-79). Эталон – образец из стали 45 закаленный до твердости 52–54 HRC. Износ образцов с покрытиями и эталона определялся на оптическом длинномере ИЗВ-1. Исследование изношенных поверхностей выполнялось на растровом электронном микроскопе марки LEO 1455 VP фирмы «Карл Цейсс» (Германия) и профилографе-профилометре модели 296 ТУ 2-034-83 завода «Калибр».

Время испытания износостойкости покрытий в различных условиях изнашивания при трении скольжения и качения с проскальзыванием принималось таким, чтобы путь трения для образцов, исследуемых на разных режимах, был одинаковым. Он составлял $20 \cdot 10^3$ м при трении со смазочным материалом и $6 \cdot 10^3$ м при трении со смазочным материалом с частицами абразива. Это связано с меньшей интенсивностью изнашивания при наличии смазки и необходимостью увеличения износа для уменьшения погрешности измерений. Испытывались партии по пять образцов.

Триботехнические характеристики покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением, и контртела для различных условий трения скольжения представлены в таблицах 1 и 2.

Анализ результатов испытаний (табл. 1) показывает, что минимальный износ пар сопряжений получен для покрытий из порошка ФБХ 6-2.

Таблица 1

Триботехнические характеристики покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением*

Материал ФМП	Параметр					
	Интенсивность изнашивания при трении скольжения, мкм/км		Момент трения скольжения $M_{тр}$, Н·м		Коэффициент трения скольжения, f	
	с маслом	с маслом и частицами абразива	с маслом	с маслом и частицами абразива	с маслом	с маслом и частицами абразива
Fe-2%V	2,1	3,2	0,72	0,84	0,10	0,12
Fe-Ti	2,7	4,2	0,72	0,84	0,10	0,12
ФБХ 6-2	1,7	2,4	0,65	0,78	0,09	0,11
Сталь 45 (эталон)	3,2	4,7	0,71	0,84	0,10	0,12

* P = 2,5 МПа; V = 2,0 м/с (n = 750 мин⁻¹); T = 293 К.

Установлено, что в различных условиях изнашивания при трении скольжения наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ 6-2 (рис. 2). Так, износостойкость этих покрытий выше в 1,7 – 1,9 раза износостойкости эталона. Износостойкость покрытий из порошка Fe-2%V по сравнению с эталоном больше в 1,3 – 1,5 раза.

Таким образом, в порядке убывания износостойкости покрытий последние можно расположить в следующей последовательности: ФБХ-6-2 → Fe-2%V → Fe-Ti → эталон (сталь 45).

Анализ результатов триботехнических исследований контртела и покрытий (табл. 1 и 2) показывает, что минимальный износ пар сопряжений при трении скольжения с маслом получен для покрытий из ферромагнитных порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V.

Это, вполне вероятно, обусловлено в первую очередь наличием в структуре покрытия остаточного аустенита – пластичной и более мягкой фазы, которая выполняет роль демпфера, снижающего динамические нагрузки на поверхность и ускоряет процесс приработки пары «образец-контртело».

Таблица 2

Интенсивность изнашивания контртела

Материал ФМП	Интенсивность изнашивания контртела (колодка из чугуна ХТВ), мкм/км	
	с маслом	с маслом и частицами абразива
Fe-2% V	2,5	3,5
Fe-Ti	2,5	4,1
ФБХ 6-2	2,8	3,7
Сталь 45 (эталон)	3,5	4,8

Положительная роль метастабильного аустенита в покрытии из порошка ФБХ-6-2 состоит в том, что он хорошо сопротивляется изнашиванию при трении скольжения со смазочным материалом, вследствие образования при трении в поверхностном слое мартенсита деформации, но и прочно удерживает от выкрашивания мелкие карбиды хрома и бора.

Установлено, что пара трения «покрытие из порошка Fe-Ti - чугун ХТВ» имеет по сравнению с другими исследуемыми трибосопряжениями наибольшие момент и коэффициент трения скольжения с маслом и маслом с частицами абразива.

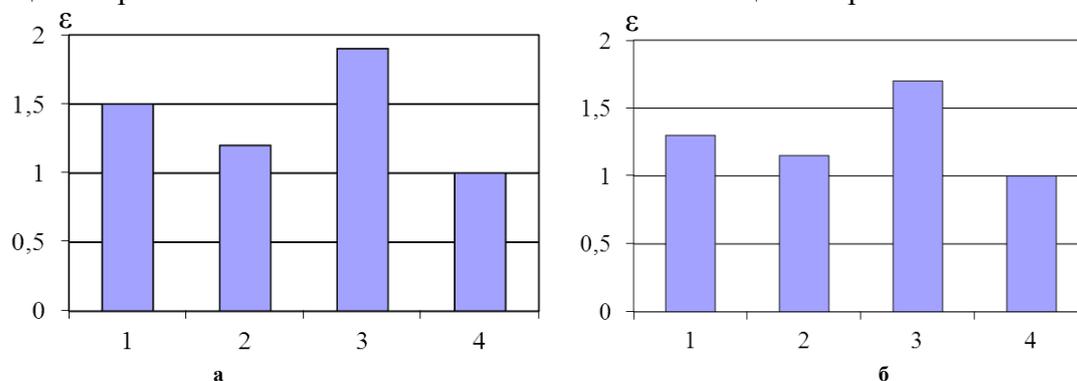


Рис. 2. Диаграммы относительной износостойкости покрытий из ФМП Fe-2%V (1), Fe-Ti (2) и ФБХ-6-2 (3), эталона (4) для следующих условий трения скольжения: со смазочным материалом (а); со смазочным материалом с частицами абразива (б)

Следовательно, для пары трения, работающей при трении скольжения со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива, рекомендуется использовать покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ-6-2, а для неподвижных соединений – покрытия из ФМП Fe-2%V или Fe-Ti.

Исследования износостойкости образцов с покрытиями и эталонных в условиях трения качения с 10 %-м проскальзыванием выполнялись с применением метода математического планирования эксперимента. В качестве исследуемого параметра принималась интенсивность изнашивания образцов. Варьируемыми факторами при изнашивании покрытий со смазочным материалом являлись нагрузка на верхний образец P , температура масла в ванне t_m , относительная скорость качения V_k и концентрация абразивных

частиц в масле $K_{ч}$. Согласно методике исследования износостойкости, режим испытаний соответствовал условиям работы деталей трансмиссий автотракторной техники, для которых характерны: относительная скорость качения V_k (0,5–3,0 м/с); нагрузка на образец P (0,5–2,5 кН); температура масла в ванне t_m (25–90°C); концентрация абразивных частиц в масле $K_{ч}$ (0,05–0,25 г/см³). При трении качения проскальзывание (η) оценивалось отношением частоты вращения (n_2) ведомого диска диаметром (d_2) к частоте вращения (n_1) ведущего диска диаметром (d_1) при условии $d_1 \approx d_2$ ($\eta = n_2/n_1$).

С учетом результатов исследований [2, 3] установили условия проведения экспериментов (табл. 3), которые рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 3

Условия проведения экспериментов

Уровень факторов	Факторы			
	P , кН	V_k , м/с	t_m , °C	$K_{ч}$, г/см ³
	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной (0)	1,5	1,75	60	0,15
Верхний (+1)	2,0	2,37	77,5	0,20
Нижний (-1)	1,0	1,12	42,5	0,10
Звездная точка (+ α)	2,5	3,0	90	0,25
Звездная точка (- α)	0,5	0,5	25	0,05
Интервалы варьирования: основной по α	0,5	0,62	17,5	0,05
	1,0	1,25	35	0,10

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКОП второго порядка с использованием средств стандартного пакета Excel Microsoft Office и математического пакета MathCAD позволили получить математико-статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра I покрытий от факторов P , V_k и t_m в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом

$$Y_1 = I_{\text{ФБХ-6-2}} = 0,627 - 1,097 \cdot X_1 - 0,0012 \cdot X_2^* - 0,0365 \cdot X_3 + 0,0042 \cdot X_1 X_2^* - 0,347 \cdot X_1 X_3 - 0,0011 \cdot X_2 X_3^* + 0,795 \cdot X_1^2 + 0,0031 \cdot X_2^{*2} + 0,00071 \cdot X_3^2; \quad (1)$$

$$Y_1 = I_{\text{Fe-2\%V}} = 1,05 - 1,456 \cdot X_1 + 0,00012 \cdot X_2^* - 0,042 \cdot X_3 - 0,0014 \cdot X_1 X_2^* + 0,591 \cdot X_1 X_3 - 0,0015 \cdot X_2 X_3^* + 1,026 \cdot X_1^2 + 0,0047 \cdot X_2^{*2} + 0,00073 \cdot X_3^2; \quad (2)$$

$$Y_1 = I_{\text{Fe-Ti}} = 1,68 - 1,406 \cdot X_1 - 0,00092 \cdot X_2^* - 0,035 \cdot X_3 + 2,341 \cdot X_1 X_3 - 0,0017 \cdot X_1 X_2^* + 0,0019 \cdot X_2 X_3^* + 0,99 \cdot X_1^2 + 0,00015 \cdot X_2^{*2} + 0,00065 \cdot X_3^2. \quad (3)$$

и математико-статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра I покрытий от факторов P , V_k , t_m и $K_{ч}$ в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива

$$Y_2 = I_{\text{фбх-6-2}} = 1,211 - 0,812 \cdot X_1 - 0,0047 \cdot X_2^* - 0,035 \cdot X_3 + 5,612 \cdot X_4 - 0,0034 \cdot X_1 X_2^* + 1,521 \cdot X_1 X_3 + 0,127 \cdot X_1 X_4 - 0,0018 \cdot X_2 X_3^* - 0,0098 \cdot X_2 X_4^* - 1,126 \cdot X_3 X_4 + 0,745 \cdot X_1^2 + 0,0019 \cdot X_2^{*2} + 0,00058 \cdot X_3^2 + 2,765 \cdot X_4^2; \quad (4)$$

$$Y_2 = I_{\text{Fe-2\%V}} = 1,46 - 1,045 \cdot X_1 + 0,00064 \cdot X_2^* - 0,0396 \cdot X_3 + 6,440 \cdot X_4 - 0,0091 \cdot X_1 X_2^* +$$

$$+1,932 \cdot X_1 X_3 + 0,567 \cdot X_1 X_4 - 0,00715 \cdot X_2 X_3 - 0,0014 \cdot X_2 X_4 - 2,314 \cdot X_3 X_4 + 0,910 \cdot X_1^2 + 0,00047 \cdot X_2^2 + 0,0008 \cdot X_3^2 + 6,795 \cdot X_4^2; \quad (5)$$

$$Y_2 = I_{\text{Fe-Ti}} = 1,876 - 0,687 \cdot X_1 - 0,00044 \cdot X_2 - 0,051 \cdot X_3 + 8,701 \cdot X_4 - 0,0057 \cdot X_1 X_2 + 0,934 \cdot X_1 X_3 + 1,347 \cdot X_1 X_4 + 0,0025 \cdot X_2 X_3 + 0,00095 \cdot X_2 X_4 + 1,017 \cdot X_3 X_4 + 0,845 \cdot X_1^2 + 0,00075 \cdot X_2^2 + 0,00095 \cdot X_3^2 + 9,451 \cdot X_4^2. \quad (6)$$

Виявлено, що не всі коефіцієнти регресії (1)–(6) значимі з 95%-й довірливою ймовірністю за критерієм Стюдента (* – коефіцієнт не значим). Установлено, що моделі адекватні при 5%-м рівні значимості за критерієм Фішера.

Аналіз математико-статистических моделей (1)–(6) показує, що в прийнятих межах варіювання відносна швидкість тріння качення V_k не має суттєвого впливу на інтенсивність изнашивания образців.

Степень впливу факторів на параметр I для різних композиційних порошків визначали за величиною коефіцієнтів моделей (1)–(6), геометрична інтерпретація яких представлена в вигляді одномерних сечень в двовимірній системі координат. Залежності, представлені на рисунках 3–5, знаходяться в факторному просторі, так як межі екстраполяції були обмежені умовою $-\alpha < X_i < +\alpha$.

Установлено, що за ступенем впливу на інтенсивність изнашивания покриттів параметри можна розташувати в ряд при трінні качення з проскальзанням по мастику: $Y_1 = I: P \rightarrow \mu_m \rightarrow V_k$ і в ряд – при трінні качення з проскальзанням по мастику з частинками абразива: $Y_2 = I: K_q \rightarrow P \rightarrow \mu_m, \rightarrow V_k$.

Аналіз залежностей інтенсивності изнашивания покриттів від навантаження P показує, що знос має нелінійний характер, збільшення концентрації абразивних домішок в мастику призводить до зростання інтенсивності изнашивания покриттів по залежності близькій до лінійної. При трінні з мастику інтенсивність изнашивания різко зростає при навантаженні більше 1,25 кН. В цьому випадку має місце процес нормального механохімічного износа, який характеризується майже лінійною залежністю износа поверхонь пар тріння і середньої об'ємної температури від навантаження. При трінні з мастику з частинками абразива, інтенсивність изнашивания зростає при нижній величині навантаження 0,5–0,8 кН. При цьому спостерігається процес руйнування трущихся поверхонь, супроводжується різким збільшенням інтенсивності тепловиділення і износа образців. Це обставина пов'язана з впливом викинутих боридних частинок покриттів і продуктів износа, потрапивших в зону тріння. В зв'язі з цим необхідно виключити потрапляння абразивних частинок в мастику в умовах експлуатації таких вузлів тріння, як «шейка вала – ролик без внутрішнього кільця».

Установлено, що з зменшенням концентрації абразивних частинок в мастику вплив температури мастику в ванні на изнашивание покриттів збільшується. При температурі мастику більше 50 С інтенсивність изнашивания покриттів різко збільшується, що, ймовірно, пов'язано з порушенням гідродинамічного режиму мастику і значущим зниженням міцності і товщини мастику шару.

Виявлено, що, за наведеними характеристиками (рис. 3–5) найкращу сумісність має пара тріння «покриття з порошку Fe-2%V-сталь ШХ15», другою є пара «покриття з порошку ФБХ-6-2-сталь ШХ15» і третьою – «покриття з порошку Fe-Ti-сталь ШХ15».

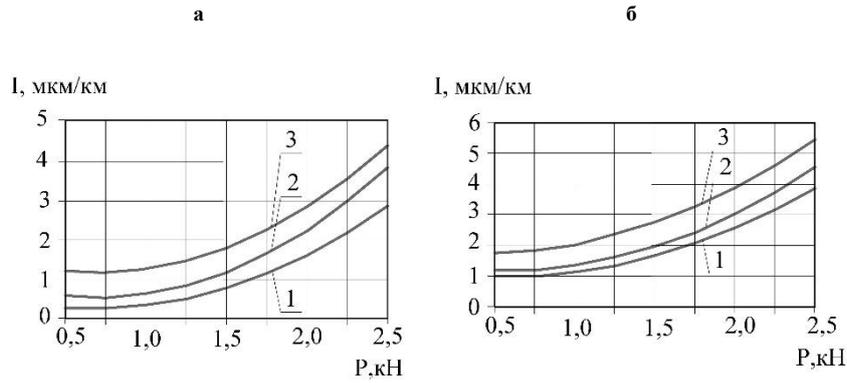


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий, полученных МЭУ, от нагрузки в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом (а) и маслом с частицами абразива (б). Покрытия из ФМП: Fe-2%V (1); FeBx-6-2 (2) и Fe-Ti (3).

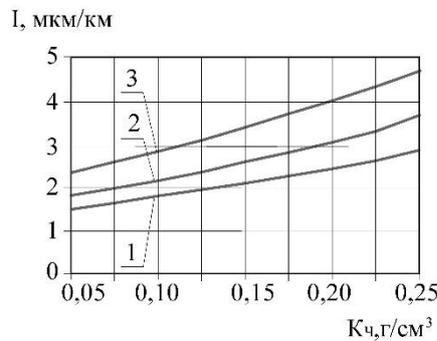


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий, полученных МЭУ, от концентрации абразивных частиц в масле в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом и частицами абразива. Покрытия из ФМП: Fe-2%V (1); FeBx-6-2 (2) и Fe-Ti (3).

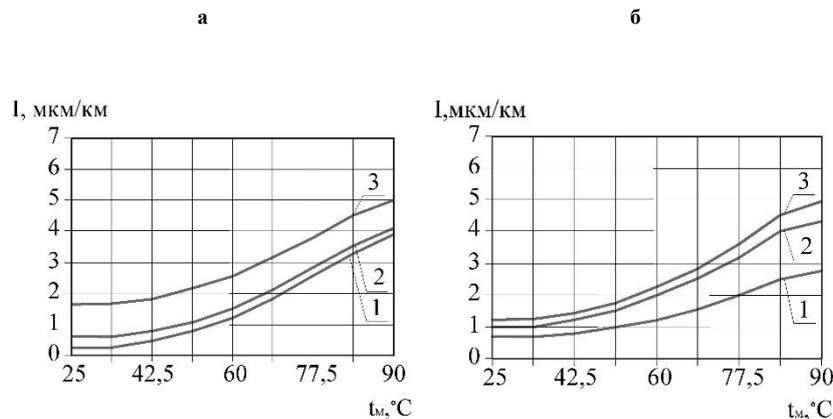


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий, полученных МЭУ, от температуры масла в ванне в условиях трения качения с проскальзыванием с маслом (а) и маслом с частицами абразива (б). Покрытия из ФМП: Fe-2%V (1); FeBx-6-2 (2) и Fe-Ti (3).

С применением графоаналитического метода двумерных сечений для принятых условий изнашивания определена оптимальная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом: $P = 0,5\text{--}1,0 \text{ кН}$ и $t_m = 25\text{--}45 \text{ }^{\circ}\text{C}$; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива: $P = 0,5\text{--}0,8 \text{ кН}$, $t_m = 25\text{--}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $K_{\text{ч}} = 0,05 \text{ г}/\text{см}^3$ [2, 3].

Анализ результатов испытаний износостойкости контртела и покрытий (рис. 6)

показывает, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошков Fe-2%V. Износостойкость этого покрытия при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива и при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом в 1,7–1,8 раза и в 1,9–2,2 раза соответственно выше износостойкости эталона.

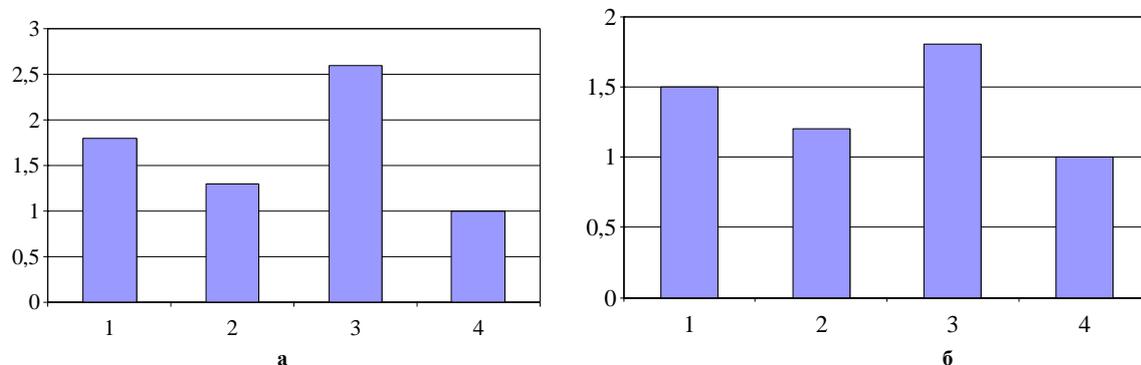


Рис. 6. Диаграммы относительной износостойкости покрытий из ФМП ФБХ-6-2 (1), Fe-Ti (2) и Fe-2%V (3), эталона (4) для условий трения качения со смазочным материалом (а), со смазочным материалом с частицами абразива (б)

Износостойкость покрытий по сравнению с эталоном для ФБХ-6-2 больше в 1,3–1,5 раза и 1,6–1,8 раза соответственно. Покрытия из порошка Fe-Ti имеют износостойкость больше эталона в 1,10–1,15 раз, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Результаты триботехнических исследований свидетельствуют о высоком уровне физико-механических свойств покрытий, полученных МЭУ на установке модели УНП 1. При этом достаточно высокое содержание метастабильного аустенита обеспечивает необходимую пластичность основы ФМП Fe-2% V и ФБХ-6-2, в результате чего приповерхностные микрообъемы покрытий способны выдерживать большее количество циклов перedeформирования в процессе изнашивания.

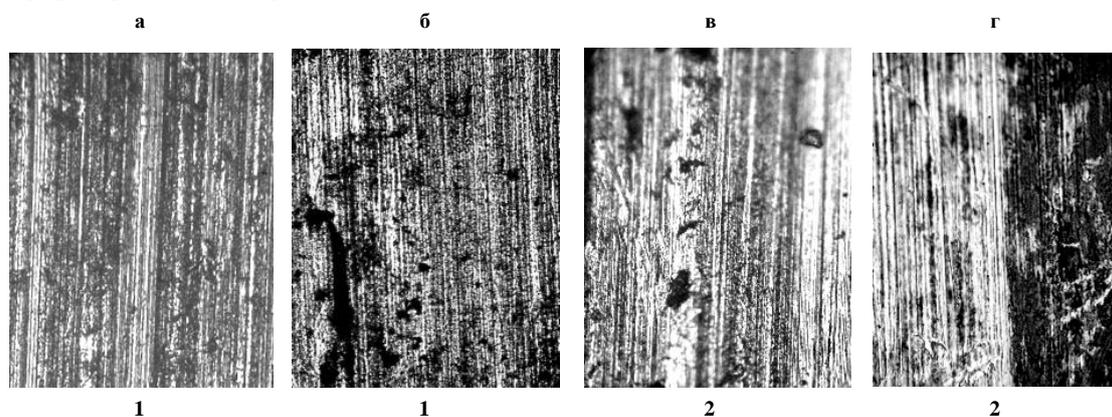


Рис. 7. Фотографии поверхностей трения образцов с покрытиями из ФМП Fe - 2%V (1) и ФБХ-6-2 (2) ($\times 200$) после приработки образцов с контролем (а, в), после испытания (путь трения образцов – 20×10^3 м) в условиях трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива (б, г)

Изучение изношенных поверхностей образцов показывает, что на поверхностях имеются участки с отколовшимися частицами, а также выглаженные участки с рисками, расположенными вдоль направления относительного перемещения контактирующих поверхностей (рис. 7). При этом шероховатость поверхностей покрытий после испытаний находится в пределах параметра $Ra = 0,5–1,2$ мкм. По всей поверхности контакта имеет место комбинированное взаимодействие поверхностей – адгезионное и упругопластическое, продуктами изнашивания которых являются равновесные тонкодисперсные частицы. По мере увеличения нагрузки на образцы происходит нарушение когезионного

взаимодействия между частицами, их выкрашивание, а также разрушение отдельных неоднородных частиц. Наряду с этим видны контуры еще не отделившихся частиц на границе участка и мелкие фрагменты их на участке со следами разрушения. В данном случае параметр шероховатости поверхностей покрытий после испытаний составил $Ra = 1,0-2,2$ мкм.

Сравнительные испытания износостойкости посадочных мест под подшипники качения валов коробок перемены передач автомобиля КаМАЗ – 53212 (вторичный 14.1701105, промежуточный 14.1701048, первичный 15.1701027), изготовленных по типовой технологии и восстановленных на установке модели УНП-1, выполнялись в условиях ремонтного производства автотракторной техники. Результаты исследований показали, что интенсивность изнашивания посадочных мест валов, изготовленных по типовой технологии и восстановленных составила $3,2 - 5,9$ мкм/км и $2,7 - 5,3$ мкм/км соответственно.

Анализ дисперсии результатов испытаний износостойкости посадочных мест под подшипники качения валов коробок перемены передач показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 11 % для стендовых и 14% – для производственных испытаний.

На основании полученных результатов исследований износостойкости покрытий, полученных МЭУ на установке модели УНП-1, можно сделать следующие выводы:

1. Электромагнитная система установки модели УНП-1 на основе постоянных магнитов стабилизирует технологические параметры процесса (силу технологического тока и магнитную индукцию в рабочем зазоре), обеспечивает равномерность и однородность покрытий по толщине.

2. Установлено, что в различных условиях изнашивания при трении скольжения наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ 6-2. В порядке убывания износостойкости покрытий последние можно расположить в следующей последовательности: ФБХ-6-2 → Fe-2%V → Fe-Ti → эталон (сталь 45).

3. Математико-статистические модели, определяющие зависимости исследуемого параметра – интенсивности изнашивания покрытий в условиях трения качения от нагрузки P показывают, что износ имеет нелинейный характер, а увеличение концентрации абразивных примесей в масле приводит к росту интенсивности изнашивания покрытий по зависимости близкой к линейной. Выявлено, что с уменьшением концентрации абразивных частиц в масле, влияние температуры масла в ванне на изнашивание покрытий, полученных МЭУ порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V, возрастает.

4. С применением графоаналитического метода двухмерных сечений для принятых условий изнашивания определена оптимальная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения со смазкой, загрязненной частицами абразива: $P = 0,5 - 0,8$ кН, $t_m = 25 - 40^\circ\text{C}$, $K_v = 0,05$ г/см³.

5. Результаты износных испытаний показывают, что для пары трения, работающей при трении скольжения, следует использовать покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ 6-2, а для пары трения, работающей при трении качения – покрытия из порошка Fe-2%V.

Литература

1. Миклуш В.П., Сайганов А.С. Организация технического сервиса в агропромышленном комплексе. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 607 с.
2. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.

3. Акулович Л.М., Миранович А.В. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58 – 65.
4. Акулович Л.М., Миранович А.В. Влияние параметров технологического тока при электромагнитной наплавке на качество покрытий // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.- практ. конф. в 2 ч. Ч.1 / Под общей ред. И. Н. Шило, Н. А. Лабушева. – Минск: БГАТУ, 2014.– С. 301 – 307.
5. Акулович Л.М., Миранович А.В., Ворошуха О.Н. Использование трансформаторных и инверторных источников технологического тока при электромагнитной наплавке // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. А. И. Свириденка и В. А. Бородули. – Гродно: ГрГУ, 2013. – С. 115 – 116.
6. Чичинадзе А.В. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для техн. вузов / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
7. Икрамов, У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа / У.А. Икрамов. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.

Summary

Akulovich L., Miranovich A. Improve the wear resistance of working surfaces machine parts magnetic electric hardening

This article discusses the application of wear-resistant coatings on metal surfaces of automotive parts and agricultural equipment using the energy of the electric and magnetic fields.

Keywords: magnetic electric hardening, electromagnetic system, the composite ferromagnetic powder, the wear resistance, the wear rate.

References

1. Miklush V.P. Saiganov AS technical service organization in the agroindustrial complex. - Minsk: ITC Ministry of Finance, 2014. - 607 p.
2. Akulovich L.M. Thermomechanical hardening of details in the electromagnetic field. – Polotsk: PSU, 1999. – 240.
3. Akulovich L.M. Miranovich A.V. Improving the quality of coatings with electromagnetic-sus- surfacing in a static magnetic field // PSU Bulletin. Series B. Pro-thinking. Applied Science. - 2008. - № 8. - S. 58 - 65.
4. Akulovich L.M. Miranovich A.V. Bliyanie technological parameters with current electromagnetic surfacing quality coatings // Modern problems have mastered-eniya new techniques, technologies, organization of technical service in the AIC: mate-rials Intern. nauch.- Pract. Conf. 2 hours. Part 1 / Under the general editorship. I. Shilo N.A. Labusheva. - Minsk: BSATU, 2014.- pp 301 - 307.
5. Akulovich L.M. Miranovich A.V. Voroshuho O.N. Using the transformer-tion and the inverter technology power sources with electromagnetic surfacing // Energy and material-clean technology: mes. rep. IX Intern. scientific and engineering. Conf. / Ed. A.I. Sviridenko and V.A. Borodulya. - Grodno: YKSUG, 2013. - S. 115 - 116.
6. A.V. Chichinadze etc. Basics of tribology (friction, wear, lubrication). primer tehn. schools / under total. Ed. A.V. Chichinadze. - 2nd ed. - M. : Engineering, 2001. - 664 p.
7. Ikramov W.A. Calculation methods for evaluating abrasion / U.A. Ikramov. - M: Mechanical engineering, 1987. - 288 p.