

**Акулович Л.М.**, доктор технических наук, профессор;  
**Миранович А.В.**, кандидат технических наук;  
**Ворошухо О.Н.**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

## **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОБРАБОТКОЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки, обеспечивающих повышение физико-механических свойств и износостойкости обрабатываемых поверхностей деталей автотракторной техники.

**Ключевые слова:** упрочнение, восстановление, магнитно-электрическое упрочнение, электромагнитное поле, постоянные магниты, электромагниты, композиционные ферромагнитные порошки, износостойкие покрытия, статистическая модель.

**Annotation.** The article describes the process magnetic hardening electric and magnetic-abrasive treatment which provides the increasing of physical-mechanical properties and performance requirements of treated surfaces details of automotive equipment.

**Keywords:** hardening, restoration, magnetic hardening electric, magnetic field electric, constant magnets, electromagnets, composite ferromagnetic powders, wear-resistant coating, the statistical model.

Одной из основных причин выхода из строя деталей 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 [1]. Изношенные поверхности большинства таких деталей могут быть восстановлены способами, которые основаны на использовании концентрированных потоков электрической и магнитной энергий.

К их числу относятся магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП) и магнитно-абразивная обработка (МАО) [2].

Технологические процессы МЭУ и МАО могут быть реализованы в едином технологическом процессе и на одном оборудовании [3, 4]. К преимуществам МЭУ относятся высокая прочность сцепления покрытия с основой, отсутствие термической деформации и специальной подготовки поверхностей. Достоинствами МАО являются возможность регулирования плотности и жесткости обрабатываемого инструмента, сформированного из ФАП, обеспечение параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей в пределах  $Ra$  (0,01 – 0,63) мкм, снижения волнистости в 8 – 10 раз, гранности до 2 раз [4, 5]. Указанные технологические процессы легко поддаются автоматизации, поскольку электрические и магнитные потоки энергии просты в реализации и удобны в управлении.

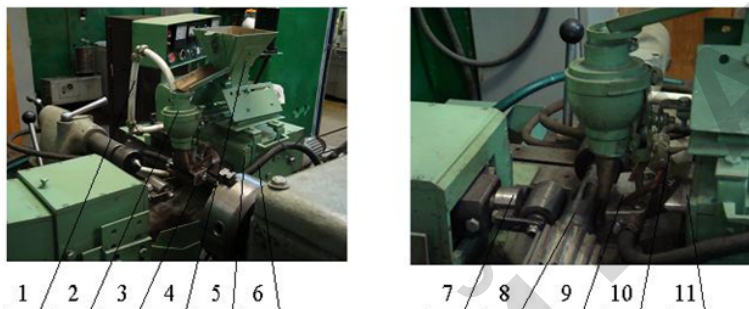
Тем не менее, основным недостатком МЭУ является неравномерность и неоднородность покрытия по толщине, что не позволяет использовать МЭУ для восстановления геометрических размеров поверхностей, износ которых составляет более 0,15 мм [2, 3]. Недостатком МАО покрытий является снижение интенсивности «саморегенерации» щетки ФАП в рабочей зоне, что негативно сказывается на производительности обработки и физико-механических свойствах обрабатываемых поверхностей крупногабаритных деталей [4, 5].

Для устранения вышеперечисленных недостатков ранее были проведены исследования, направленные на интенсификацию процессов МЭУ и финишной обработки покрытий путем разработки специальных электромагнитных систем (ЭМС) [6 – 8].

Так, для синхронизации воздействий электрическими разрядами и внешним электромагнитным полем (ЭМП) на частицы ФМП и упрочняемую поверхность в рабочей зоне устройств МЭУ предложено использовать постоянные магниты (ПМ) вместо электромагнитов. При этом наибольшая стабильность процесса МЭУ 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  $\alpha = 12^\circ$  [6, 7]. В качестве ИТТ принят инверторный источник питания



трения качения с проскальзыванием со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива не исследован. Поэтому целью работы является исследование влияния параметров, характеризующих условия работы деталей трансмиссий автотракторной техники на износостойкость покрытий, полученных МЭУ и МАО.



- 1 – трубопровод для подачи рабочей жидкости; 2 – смеситель; 3 – полусный наконечник; 4 – бункер-дозатор; 5 – электромагнитный питатель; 6 – трубопровод для подачи охлаждающей жидкости наконечника; 7 – накатное устройство; 8 – изделие; 9 – сопло; 10 – трубопровод для подачи защитного газа; 11 – сердечник магнита постоянного

Рисунок 2 – Установка магнитно-электрического упрочнения

Триботехнические испытания образцов из стали 45 ГОСТ 1050-88 закаленной до твердости 52–54 HRC с покрытиями из ферромагнитных порошков Fe-2%V и ФБХ-6-2 проводились в условиях изнашивания со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива при трении качения с 10 %-м проскальзыванием на машине трения модели 2070 СМТ-1 в соответствии с ГОСТ 30480-97 и ГОСТ 23.224-86 по схеме «диск-диск» (контртело из стали ШХ15 ГОСТ 801-78 закаленное до твердости 60–62 HRC, смазочный материал – трансмиссионное масло 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.

Для обеспечения точности и достоверности исследований на износостойкость образцы с покрытиями испытывались в условиях

максимально приближенным к эксплуатационным с применением метода математического планирования эксперимента [10 – 12].

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКОП второго порядка, с использованием прикладных программ Mathcad и Excel пакета MS Office, позволили получить статистические модели (1 и 2), определяющие зависимости исследуемого параметра I покрытий, полученных ЭМН, от факторов  $X_1 = P$ ,  $X_2 = K_ч$ ,  $X_3 = t_м$  и  $X_4 = V_к$ .

$$Y_1 = I_{ФБХ\ 6-2} = 1,211 - 0,812 \cdot X_1 + 5,612 \cdot X_2 - 0,035 \cdot X_3 - 0,0047 \cdot X_4^* + 0,127 \cdot X_1 X_2 + 1,521 \cdot X_1 X_3 - 0,0034 \cdot X_1 X_4^* - 1,126 \cdot X_2 X_3 - 0,0098 \cdot X_2 X_4^* - 0,0018 \cdot X_3 X_4^* + 0,745 \cdot X_1^2 + 5,612 \cdot X_2^2 + 0,00058 \cdot X_3^2 + 0,0019 \cdot X_4^{*2} \quad (1)$$

$$Y_2 = I_{Fe-2\%V} = 1,46 - 1,045 \cdot X_1 + 6,440 \cdot X_2 + 0,0009 \cdot X_3 + 0,00064 \cdot X_4^* + 0,567 \cdot X_1 X_2 + 1,932 \cdot X_1 X_3 - 0,0091 \cdot X_1 X_4^* - 2,314 \cdot X_2 X_3 - 0,0014 \cdot X_2 X_4^* - 0,00715 \cdot X_3 X_4^* + 0,910 \cdot X_1^2 + 6,975 \cdot X_2^2 + 0,00090 \cdot X_3^2 + 0,00047 \cdot X_4^{*2} \quad (2)$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессий (8 и 9) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (\* коэффициент не значим). Установлено, что модель адекватна при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Анализ статистических моделей (1 и 2) показывает, что в принятых пределах варьирования относительная скорость трения не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания образцов. Установлено, что по степени влияния на интенсивность изнашивания покрытий параметры можно расположить в ряд при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом:  $Y_1 = I: P \rightarrow t_м \rightarrow V_к$  и в ряд – при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива:  $Y_2 = I: K_ч \rightarrow P \rightarrow t_м \rightarrow V_к$ . Относительная скорость трения качения  $V_к$  не оказывает существенного влияния на интенсивность изнашивания поверхностей образцов. Установлено, что интенсивность изнашивания покрытий из порошка Fe-2%V в 1,5–2,1 раза ниже, чем для покрытий из порошка ФБХ-6-2, из-за большего содержания метастабильного

аустенита, обеспечивающего пластичность основы наплавленного слоя. С применением графоаналитического метода двумерных сечений для принятых условий изнашивания определена рациональная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом:  $P = 0,5-1,0$  кН и  $t_m = 25-45$  °С; при трении качения с проскальзыванием со смазочным материалом с частицами абразива:  $P = 0,5-0,8$  кН,  $t_m = 25-40$  °С,  $K_ч = 0,05$  г/см<sup>3</sup>.

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 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 [6, 11, 12].

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 УНП-1 и обработанных на установке МАО с дополнительной МС, можно сделать следующие выводы:

1 Электромагнитная система установки УНП-1 на основе постоянных магнитов стабилизирует технологические параметры процесса (силу технологического тока и магнитную индукцию в РЗ), обеспечивает равномерность и однородность покрытий по толщине. Установка МАО с дополнительной МС в процессе финишной обработки покрытий обеспечивает магнитное упрочнение поверхности.

2 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 ЭМН порошков ФБХ-6-2 и Fe-2%V, возрастает.

3 Для принятых условий изнашивания определена оптимальная область работы исследуемых трибосопряжений при трении качения со смазкой, загрязненной частицами абразива:  $P = 0,5 - 0,8$  кН,  $t_m = 25 - 40^\circ\text{C}$ ,  $Kч = 0,05$  г/см<sup>3</sup>.

#### Список использованной литературы

1 Миклуш, В.П. 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 Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.

4 Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 176с.

5 Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.

6 Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58 – 65.

7 Акулович, Л.М. 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.

8 Акулович, Л.М. 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.

9 Ящерицын, П.И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. – Минск: Наука и техника, 1989. – 271 с.

10 Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для техн. вузов / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

11 Кожуро, Л.М. Формирование триботехнических свойств деталей машин наплавкой в электромагнитном поле // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – № 3. – С. 21 – 24.

12 Икрамов, У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа / У.А. Икрамов. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.