

### Список использованных источников

1. Коваленко, В.П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В.П. Коваленко, А.А. Ильинский. – Москва: Химия, 1982. – 272 с.
2. Андрушевич, А.А. Регенерация фильтрующих элементов на основе металлических порошков, волокон и сеток в хозяйствах агропромышленного комплекса / А.А. Андрушевич [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации: материалы конф., посвящ. 60-летию создания БГАТУ и памяти Сулова, Минск, 4–6 июня 2014 г. / БГАТУ; под общ. ред. И.Н. Шило, Н.А. Лабушева, в 2 ч. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 221–225.
3. Азаров, С.М. Оценка эффективности работы фильтрующих композиций при очистке воды оборотных систем / С.М. Азаров [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск, 2009. – Вып. 32. – С. 114–120.
4. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. /В.Г. Айнштейн [и др.] // под ред. В.Г. Айнштейна. – Москва: Люкс; Высшая школа, 2003. – Кн. 1. – 912 с.

УДК 621.791.92 : 621.81

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Магистрант – Щурский Д.С., маг 19 тс, ФТС  
Научный  
руководитель – Миранович А.В., к.т.н., доцент  
УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе изучено влияние технологических параметров комбинированной обработки магнитно-электрического упрочнения и электромеханической обработкой на параметры качества покрытий.

**Ключевые слова:** комбинированная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, электромеханическая обработка, технологические параметры, оптимизация процесса, шероховатость и разнотолщинность покрытий.

Износостойкость рабочих поверхностей деталей машин обеспечивается применением современных способов упрочнения, использующих концентрированные потоки энергии [1, 2]. Одним из них является магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ), обеспечивающее многослойное нанесение износостойких покрытий из ферромагнитных порошков (ФМП) [3]. Дефектами, снижающими износостойкость формируемых поверхностных слоев, является их шероховатость и разнотолщинность [3, 4].

Для обеспечения стабильной толщины наносимого покрытия и уменьшения его шероховатости предложен технологический способ и разработано устройство для комбинированной обработки – МЭУ ферромагнитным порошком с последующей электромеханической обработкой (ЭМО) [3, 4]. Следует отметить, что к достоинствам МЭУ можно отнести низкую температуру нагрева детали в процессе обработки, что исключает тепловую деформацию обрабатываемой поверхности. Кроме того, процесс обеспечивает высокую прочность соединения наносимого материала с основой, диффузионное насыщение поверхности детали легирующими элементами. Проведение МЭУ совместно с ЭМО позволяет использовать технологическое тепло, выделяющееся при упрочнении, что дает возможность объединить операции нанесения и термомодеформационного упрочнения покрытия. Такая комбинация двух технологических операций создает условия для формирования прочного и износостойкого поверхностного слоя детали.

С целью обеспечения заданных параметров качества поверхностей деталей выполнены исследования влияния на них технологических параметров комбинированного способа обработки с применением математического планирования эксперимента.

Анализ априорной информации и проведенные ранее исследования [3, 4] показали, что процесс МЭУ с ЭМО достаточно полно описывается статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице центрального композиционного ротatableного униформ плана (ЦКРУП) [5, 6].

В качестве параметров многопараметрической оптимизации МЭУ с ЭМО выбрали следующие параметры: шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  и разнотолщинность покрытий  $t_n$ . Последние определяли по методикам, изложенным в работе [3, 5, 6].

Независимыми переменными приняты основные технологические факторы режима МЭУ с ЭМО: плотности технологического тока при МЭУ ( $i$ , А/мм<sup>2</sup>) и ЭМО ( $i_э$ , А/м<sup>2</sup>); рабочий зазор ( $d$ , мм); усилие накатывания электродом-инструментом ( $P_э$ , Н); скорость подачи ( $S$ , мм/об).

Постоянными взяты факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре  $B=0,7$  Тл; размер зерен ФМП  $D=250-315$  мкм; удельный расход ФМП  $q_{ф}=3,2 \cdot 10^{-3}$  г/(смм<sup>2</sup>), удельный расход рабочей жидкости  $q_{ж}=0,4 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(смм<sup>2</sup>), напряжение на накатном устройстве с роликовым электродом-инструментом  $U_э=2-6$  В; СОЖ – 5%-й раствор товарного эмульсола Э2-Б в воде. Оптимальные значения принятых постоянных факторов были определены в работах [1, 3, 4]. В качестве ФМП использовались ФБХ-6-2 и Н70Х17С4Р4.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45 ГОСТ 1050, представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Образцы подвергали нормализации и обрабатывали до шероховатости поверхности  $Ra=12,5$  мкм.

Условия проведения эксперимента приведены в таблице 1. Все опыты рандомизировались во времени при помощи генератора случайных чисел.

Таблица 1 – Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы				
	$i, A/mm^2$	$d, mm$	$S, mm/об$	$i_3, A/mm^2$	$P_3, H$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Основной (0)	1,80	2,00	0,25	100	1000
Верхний (+1)	2,20	2,50	0,35	120	1250
Нижний (-1)	1,40	1,50	0,15	80	750
Звездная точка (+а)	2,60	3,00	0,45	140	1500
Звездная точка (-а)	1,00	1,00	0,05	60	500
Интервалы варьирования:					
основной	0,40	0,50	0,10	20	250
по а	0,80	1,00	0,20	40	500

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием прикладной программы Excel пакета MS Office, работающей в среде Windows, позволила получить математико-статистические модели, устанавливающие зависимости исследуемых параметров  $R_a$  (1, 2) и  $t_n$  (3, 4) от технологических факторов:

$$Y_1 = R_{aФБХ-6-2} = 8,94 + 0,121 \times X_1 - 0,041 \times X_2 - 0,161 \times X_3 - 0,202 \times X_4 + 0,071 \times X_5 - 0,510 \times X_1 \times X_2 + 0,0108 \times X_1 \times X_3 + 0,454 \times X_1 \times X_4 + 0,552 \times X_1 \times X_5 + 0,182 \times X_2 \times X_3 + 0,551 \times X_2 \times X_4 - 0,451 \times X_2 \times X_5 - 0,601 \times X_3 \times X_4 + 0,114 \times X_3 \times X_5 - 0,516 \times X_4 \times X_5 - 0,097 \times X_1^2 - 0,051 \times X_2^2 - 0,031 \times X_3^2 - 0,063 \times X_4^2 - 0,097 \times X_5^2; \quad (1)$$

$$Y_1 = R_{aH70X17C4P4} = 6,09 - 0,146 \times X_1 - 0,093 \times X_2 - 0,213 \times X_3 + 0,120 \times X_4 + 0,093 \times X_5 - 0,403 \times X_1 \times X_2 + 0,0123 \times X_1 \times X_3 + 0,556 \times X_1 \times X_4 + 0,326 \times X_1 \times X_5 + 0,127 \times X_2 \times X_3 + 0,415 \times X_2 \times X_4 - 0,601 \times X_2 \times X_5 - 0,264 \times X_3 \times X_4 + 0,345 \times X_3 \times X_5 - 0,219 \times X_4 \times X_5 - 0,109 \times X_1^2 - 0,038 \times X_2^2 + 0,013 \times X_3^2 + 0,066 \times X_4^2 - 0,049 \times X_5^2; \quad (2)$$

$$Y_2 = t_{nФБХ-6-2} = 35,98 - 0,617 \times X_1 - 0,324 \times X_2 + 0,519 \times X_3 - 0,712 \times X_4 + 0,326 \times X_5 - 0,934 \times X_1 \times X_2 + 0,149 \times X_1 \times X_3 + 0,042 \times X_1 \times X_4 + 1,023 \times X_1 \times X_5 + 0,588 \times X_2 \times X_3 + 0,878 \times X_2 \times X_4 - 0,942 \times X_2 \times X_5 - 1,062 \times X_3 \times X_4 + 0,024 \times X_3 \times X_5 - 0,766 \times X_4 \times X_5 - 0,178 \times X_1^2 + 0,348 \times X_2^2 - 0,246 \times X_3^2 + 0,184 \times X_4^2 - 0,128 \times X_5^2; \quad (3)$$

$$Y_2 = t_{nH70X17C4P4} = 32,06 + 0,228 \times X_1 + 0,278 \times X_2 - 0,684 \times X_3 - 0,636 \times X_4 - 0,278 \times X_5 - 0,826 \times X_1 \times X_2 + 0,124 \times X_1 \times X_3 + 1,062 \times X_1 \times X_4 + 0,768 \times X_1 \times X_5 + 0,324 \times X_2 \times X_3 + 0,956 \times X_2 \times X_4 - 0,822 \times X_2 \times X_5 - 0,456 \times X_3 \times X_4 + 0,862 \times X_3 \times X_5 - 1,038 \times X_4 \times X_5 - 0,678 \times X_1^2 + 1,016 \times X_2^2 - 0,386 \times X_3^2 - 0,478 \times X_4^2 + 0,636 \times X_5^2; \quad (4)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (1) – (4) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента ( $t^*$  - коэффициент не

значим). Также установлено, что математико-статистические модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Степень влияния технологических факторов МЭУ с ЭМО на параметры оптимизации  $R_a$  и  $t_n$  определяли по величине коэффициентов моделей (1) – (4). Из анализа математико-статистических моделей (1) – (4) следует, что в порядке убывания значимости факторы по влиянию на исследуемые параметры можно расположить в следующие ряды:

$$Y_1 = R_a: P_3 \text{ ® } i_3 \text{ ® } i \text{ ® } S \text{ ® } d;$$

$$Y_2 = t_n: i_3 \text{ ® } i \text{ ® } P_3 \text{ ® } d \text{ ® } S.$$

Многопараметрическую оптимизацию процесса МЭУ с ЭМО проводили по двум параметрам ( $Y_1 = R_a$  и  $Y_2 = t_n$ ). Для этого использовали комплексный показатель, в качестве которого была принята обобщенная функция желательности Харрингтона [7, 8].

Обработку данных производили с помощью пакета прикладных программ MATHCAD, работающих в среде Windows. За оптимальный приняли режим МЭУ с ЭМО, который имеет наибольшую желательность.

Исследованиями установлено, что значения оптимальных режимов комбинированной обработки имеют незначительные отличия (таблица 2), а по некоторым факторам почти совпадают.

Таблица 2 – Оптимальные режимы МЭУ с ЭМО для ФМП

Материал ФМП	Оптимальные значения факторов				
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$d$ , мм	$S$ , мм/об	$i_3$ , А/м <sup>2</sup>	$P_3$ , Н
ФБХ-6-2	1,91	1,50	0,220	110,0	750,0
Н70Х17С4Р4	1,87	2,00	0,185	100,0	500,0

Таким образом, с помощью многопараметрической оптимизации и принятых ограничений для комбинированной обработки МЭУ с ЭМО различных ФМП, можно рекомендовать следующий режим:  $i = 1,87 - 1,91$  А/мм<sup>2</sup>;  $d = 1,5 - 2,0$  мм;  $S = 0,185 - 0,220$  мм/об;  $i_3 = 100,0 - 110,0$  А/м<sup>2</sup>;  $P_3 = 500,0 - 750$  Н.

#### Список использованных источников

1. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
2. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
3. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
4. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2016. – 236 с.

5. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 236 с.

6. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

7. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – Брянск : БГТУ, 2004. – 271 с.

8. Хейфец, М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. – Новополоцк : ПГУ, 1999. – 104 с.

УДК 621.791.92 : 621.81

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ СОШНИКОВ ПОСЕВНЫХ И ПОСАДОЧНЫХ МАШИН**

*Студенты – Дзюба М.А., 36 тс, 3 курс ФТС;  
Устиненко И.Ю., 36 тс, 3 курс, ФТС;  
Асадчев А.И., 4 зрпт, 6 курс, ФТС*

*Научный  
руководитель – Миранович А.В., к.т.н., доцент  
УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе рассмотрены технологические способы восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов посевных и посадочных машин.

**Ключевые слова:** посевные и посадочные машины, дисковые рабочие органы, диски сошников, технологические способы восстановления и упрочнения, магнитно-электрическое упрочнение, электромеханическая обработка.

Одной из актуальных проблем в машиностроительном и ремонтном производстве является повышение надежности сельскохозяйственной техники. Решение этого вопроса может быть обеспечено применением новых технологических способов восстановления и упрочнения их деталей [1, 2].

Известно [3, 4], что рабочие органы (диски сошников) посевных и посадочных машин (например, агрегатов почвообрабатывающих посевных АПП-6Д производства ОАО «Лидагропромаш» или картофелесажалок полунавесных СК-4 производства ГП «Экспериментальный завод «РУП НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства») подвергаются