

8. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 44 с.

9. Бетенья, Г. Ф. Технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью / Г. Ф. Бетенья // Каталог научно-технических разработок университета. – Минск : БГАТУ, 2014.

10. Балаян, Г. Е. Особенности технологии электроискрового упрочнения буровой коронки / Г. Е. Балаян, И. В. Перинская // Перспективное развитие науки, техники и технологий : сборник научных статей 12-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 01 ноября 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 29-33.

11. Способ изготовления пластинчатого молотка кормодробилки: пат. №24736 Респ. Беларусь : : МПК В 02С 13/28 / Анискович Г. И., Шевчук М.А., Шукан М.М. ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а20240142 ; заявл. 20.06.2024 ; опубл. 20.11.2025.

Summary. Thus, a comprehensive approach to hammer hardening through a combination of ESD and pulse quench cooling is a promising direction for increasing the reliability and durability of hammer mills.

УДК 621.791.92 : 621.81

Миранович А.В., кандидат технических наук, доцент;

Косак А.А., магистрант; **Афанасенко Д.Е.**, аспирант

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

КОМБИНИРОВАННАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ СЕРИИ ХЦМ

Аннотация. Выполнена многопараметрическая оптимизация комбинированной упрочняющей обработки магнитно-электрическим упрочнением с поверхностным пластическим деформированием металлических поверхностей цилиндрических деталей электронасосных агрегатов серии ХЦМ.

Abstract. A multiparameter optimization of combined strengthening treatment by magnetic-electric hardening with surface plastic deformation of metal surfaces of cylindrical parts of electric pump units of the HCM series was performed.

Ключевые слова: комбинированная упрочняющая обработка, магнитно-электрическое упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, композиционный порошок, многопараметрическая оптимизация, износостойкость покрытия, производительность процесса.

Keywords. combined hardening treatment, magnetic-electric hardening, surface plastic deformation, composite powder, multiparameter optimization, coating wear resistance, process performance

Электронасосные агрегаты (ЭА) серии ХЦМ (герметичные центробежные насосы с магнитной муфтой) наиболее широко эксплуатируются в

химической, нефтехимической, фармацевтической и пищевой промышленности, энергетике и очистных сооружениях [1]. Бессальниковая конструкция агрегатов позволяет минимизировать утечки перекачиваемых химически активных и нейтральных жидкостей (кислот, щелочей, органических растворителей, горючих и токсичных жидкостей, реактивов, растворов технических моющих средств, жидких пищевых продуктов). Для ЭА серии ХЦМ (например, агрегат электронасосный ХЦМ 12/25М) характерны такие условия работы как, значительные пусковые нагрузки, длительная работа при высоких нагрузках, повышенное содержание солей, щелочей и других примесей и средств, высокая концентрация взвешенных твердых частиц, превышение допустимой вязкости перекачиваемой жидкости [1]. Все это существенно снижает надежность работы сборочных единиц и отдельных деталей электронасосных агрегатов. При этом одной из основных причин их выхода из строя являются механические повреждения в результате износа посадочного места рабочего колеса под втулку подшипникового узла, износа рабочей поверхности подшипника и распорной втулки вала приводного электродвигателя, изгиб вала. Устранение данных дефектов возможно посредством обоснованного выбора и оптимизации способа восстановления изношенных поверхностей цилиндрических деталей электронасосных агрегатов. Для этого необходимо учитывать условия эксплуатации, степень износа, состояние рабочих поверхностей, конструктивные параметры и материал детали.

Известно [2], что основными способами восстановления типовых деталей электронасосных агрегатов являются: вибродуговая наплавка, электроконтактная приварка, наплавка под слоем флюса и в среде защитных газов. Им присущи такие недостатки, как высокое термическое воздействие на обрабатываемую поверхность, расплавление основного металла и невысокая усталостная прочность восстанавливаемых деталей [2, 3]. Одним из рациональных способов восстановления рабочих поверхностей деталей электронасосных агрегатов является комбинированная упрочняющая обработка (КУО) посредством магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (КФМП) с поверхностным пластическим деформированием (ППД). Преимуществами ее являются высокая прочность сцепления упрочненного слоя с основой, минимальное тепловыделение и расплавление материала основы, небольшие припуски на последующую механическую обработку, возможность осуществления процесса на одном технологическом оборудовании с финишной обработкой – магнитно-абразивной (МАО) [4, 5].

В работе с целью обеспечения заданных эксплуатационных и физикомеханических свойств поверхностей типовых деталей ЭА серии ХЦМ проведены исследования с применением метода на основе многопарамет-

рической оптимизации режима КУО с использованием детерминированного и стохастического подходов [5, 6].

Процесс МЭУ композиционными ферромагнитными порошками и последующим ППД достаточно полно описывается статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице центрального композиционного рототабельного униформ-планирования (ЦКРУП). В качестве параметров оптимизации КУО взяты следующие параметры: производительность процесса Q и относительная износостойкость покрытия ε . Испытания износостойкости образцов с покрытиями, полученными МЭУ с ППД и обработанных при оптимальных условиях и режимах процессов, проводились на машине трения модели СМЦ-2 по стандартной методике по схеме «диск-колодка» при сравнительной оценке износостойкости покрытий при трении скольжения.

Независимыми переменными приняты следующие факторы: плотность разрядного тока i , А/мм²; величина рабочего зазора δ , мм; скорость подачи S , мм/об; окружная скорость заготовки V , м/с; усилие деформирования накатного устройства P , Н. Постоянными взяты факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре $B = 0,7$ Тл; размер зерен композиционного порошка $\Delta = 240 - 315$ мкм; расход композиционного порошка $q = 2,6 \cdot 10^{-3}$ г/с·мм²; расход рабочей жидкости $q = 1,8 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²), СОЖ – 5%-й водный раствор международного ассортимента Syntilo RHS фирмы Castrol Industrial. Оптимальный технологический режим КУО МЭУ с ППД для следующих композиционных порошков – Н67Х18С5Р4 и ФБХ-6-2. Выбор обусловлен тем, что порошок Н67Х18С5Р4 позволяют получить покрытия с достаточно высокой твердостью и высокими триботехническими свойствами, а сплав ФБХ 6-2 обеспечивает получение покрытий, сохраняющих высокую твердость, плотность и износостойкость до температуры, не превышающей 550 °С в сопряжениях пар трения.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из стали 45 ГОСТ 1050-2013, представляющих собой кольца с наружным диаметром 40,0 мм, внутренним – 16,0 мм и высотой 12,0 мм. Образцы подвергали нормализации и обрабатывали до шероховатости поверхности $Ra = 12,5$ мкм.

Многопараметрическую оптимизацию КУО проводили по двум параметрам ($Y_1=Q$, $Y_2=\varepsilon$). Для этого использовали комплексный показатель [5, 6], в качестве которого была принята обобщенная функция желательности Харрингтона [7].

С учетом работ [5, 6] установили условия проведения эксперимента для получения статистических моделей нанесения износостойких покрытий МЭУ с ППД (таблица 1). Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 1 – Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы				
	$i, \text{А/мм}^2$	$\delta, \text{мм}$	$S, \text{мм/об}$	$V, \text{м/с}$	$P, \text{Н}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Основной (0)	1,80	2,00	0,25	0,06	1000
Верхний (+1)	2,20	2,50	0,35	0,08	1250
Нижний (-1)	1,40	1,50	0,15	0,04	750
Звездная точка (+ α)	2,60	3,00	0,45	0,10	1500
Звездная точка (- α)	1,00	1,00	0,05	0,02	500
Интервалы варьирования: основной по α	0,40	0,50	0,10	0,02	250
	0,80	1,00	0,20	0,04	500

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием прикладных программ Mathcad и Excel пакета MS Office, работающих в среде Windows, позволила получить статистические модели, определяющие зависимости производительности КУО Q от технологических факторов.

$$Y_1 = Q_{\text{H67X18C5P4}} = 221,978 + 1,121 \cdot X_1 - 0,392 \cdot X_2 - 1,580 \cdot X_3 - 2,088 \cdot X_4 + 0,756 \cdot X_5 - 4,482 \cdot X_1 X_2 + 0,102 \cdot X_1 X_3^* + 4,354 \cdot X_1 X_4 + 5,678 \cdot X_1 X_5 + 1,696 \cdot X_2 X_3 + 5,642 \cdot X_2 X_4 - 4,442 \cdot X_2 X_5 - 5,918 \cdot X_3 X_4 + 0,284 \cdot X_3 X_5 - 6,004 \cdot X_4 X_5 - 0,912 \cdot X_1^2 - 0,494 \cdot X_2^2 - 0,296 \cdot X_3^2 - 0,588 \cdot X_4^2 - 0,99 \cdot X_5^2; \quad (1)$$

$$Y_1 = Q_{\text{ФБХ-6-2}} = 220,112 + 0,906 \cdot X_1 - 0,386 \cdot X_2 - 1,390 \cdot X_3 - 1,946 \cdot X_4 + 0,302 \cdot X_5 - 3,846 \cdot X_1 X_2 - 0,098 \cdot X_1 X_3^* - 4,076 \cdot X_1 X_4 - 4,858 \cdot X_1 X_5 - 1,236 \cdot X_2 X_3 + 4,846 \cdot X_2 X_4 - 4,042 \cdot X_2 X_5 - 5,878 \cdot X_3 X_4 + 0,124 \cdot X_3 X_5 - 4,988 \cdot X_4 X_5 - 0,898 \cdot X_1^2 - 0,481 \cdot X_2^2 - 0,276 \cdot X_3^2 - 0,498 \cdot X_4^2 - 1,509 \cdot X_5^2. \quad (2)$$

Модели, определяющие характер зависимости относительной износостойкости покрытия ε от технологических факторов КУО, представлены ниже.

$$Y_2 = \varepsilon_{\text{H67X18C5P4}} = 2,156 + 0,158 \cdot X_1 + 0,032 \cdot X_2 - 0,187 \cdot X_3 - 0,088 \cdot X_4 - 0,042 \cdot X_5 + 0,154 \cdot X_1 X_2 - 0,642 \cdot X_1 X_3 + 0,156 \cdot X_1 X_4 - 0,172 \cdot X_1 X_5 - 0,322 \cdot X_2 X_3 + 0,072 \cdot X_2 X_4 - 0,144 \cdot X_2 X_5 - 0,176 \cdot X_3 X_4 - 0,082 \cdot X_3 X_5^* - 0,212 \cdot X_4 X_5 - 0,116 \cdot X_1^2 - 0,022 \cdot X_2^2 - 0,032 \cdot X_3^2 - 0,030 \cdot X_4^2 - 0,064 \cdot X_5^2; \quad (3)$$

$$Y_2 = \varepsilon_{\text{ФБХ-6-2}} = 2,268 + 0,172 \cdot X_1 - 0,026 \cdot X_2 - 0,228 \cdot X_3 - 0,112 \cdot X_4^* - 0,048 \cdot X_5 + 0,182 \cdot X_1 X_2 - 0,642 \cdot X_1 X_3^* - 0,112 \cdot X_1 X_4 - 0,204 \cdot X_1 X_5 - 0,218 \cdot X_2 X_3 + 0,114 \cdot X_2 X_4 - 0,194 \cdot X_2 X_5 - 0,116 \cdot X_3 X_4 + 0,112 \cdot X_3 X_5 + 0,268 \cdot X_4 X_5 - 0,086 \cdot X_1^2 - 0,016 \cdot X_2^2 - 0,058 \cdot X_3^2 - 0,052 \cdot X_4^2 - 0,078 \cdot X_5^2. \quad (4)$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессии (1) – (4) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (* – коэффициент не значим). Установлено, что модели адекватны при 5%-м уровне значи-

мости по критерию Фишера. Таким образом, получены модели процесса МЭУ с ППД (1) – (4), которые позволяют установить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальный режим КУО.

Из анализа статистических моделей (1) – (4) следует, что в порядке убывания значимости факторы по влиянию на исследуемые параметры можно расположить в следующие ряды:

$$Y_1=Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow P \rightarrow \delta;$$

$$Y_2=\varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow P \rightarrow V \rightarrow \delta.$$

Наибольшее влияние на производительность процесса МЭУ с ППД Q оказывает окружная скорость заготовки V и скорость продольной подачи S. Далее в порядке убывания следуют плотность разрядного тока i, усилие деформирования P и величина рабочего зазора δ . На относительную износостойкость ε оказывает значительное влияние скорость продольной подачи S, плотность разрядного тока i и усилие деформирования P.

С учетом ограничений технологических факторов КУО, определены варианты режимов нанесения покрытий для исследуемых композиционных порошков. Обработку данных производили с использованием пакета прикладных программ Mathcad и Excel пакета MS Office, работающих в среде Windows. Приняли режим МЭУ с ППД за оптимальный, который имеет наибольшую желательность.

Исследованиями установлено, что значения оптимальных режимов КУО имеют незначительные отличия (таблица 2).

Таблица 2 – Оптимальные значения режима КУО композиционных порошков

Композиционный порошок	Оптимальные значения факторов				
	i, А/мм ²	δ , мм	S, мм/об	V, м/с	P, Н
H67X18C5P4	1,92	1,50	0,218	0,056	1146
ФБХ-6-2	1,96	1,55	0,192	0,052	1228

Таким образом, с помощью многопараметрической оптимизации и принятых ограничений для КУО посредством МЭУ с ППД различных композиционных порошков, можно рекомендовать следующий режим: i = 1,92 – 1,96 А/мм²; δ = 1,50 – 1,55 мм; S = 0,192 – 0,218 мм/об; V = 0,052 – 0,056 м/с; P = 1146 – 1228 Н.

Список использованных источников

1. Агрегаты электронасосные ХЦМ Q/H В-К. Руководство по эксплуатации ПДИР.060240.002 РЭ. – Йошкар-Ола: Изд-во ОАО «ОКТЕ Кристалл», 2020. – 30 с.
2. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин и др.; под общ. ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
3. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.

4. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ. 1999. – 240 с.

5. Акулович, Л.М. Оптимизация технологических факторов магнитно-электрического упрочнения / Л.М. Акулович [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. - 2020. Т. 65, № 4. - С. 404-412. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

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

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

Summary. By means of multiparameter optimization and accepted limitations for combined strengthening treatment of various composite powders, technological processing modes are recommended.

УДК 621.791.92 : 621.81

Миранович А.В.¹, кандидат технических наук, доцент;

Афанасенко Д.Е.¹, аспирант

Афанасенко Е.В.², кандидат технических наук, доцент

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

² Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», г. Горки, Республика Беларусь

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Разработано устройство для комбинированной упрочняющей обработки магнитно-электрическим упрочнением с поверхностной пневмовибродинамической обработкой металлических поверхностей нежестких деталей. Представлены результаты исследований микротвердости и качества покрытий, полученных комбинированной упрочняющей обработкой.

Ключевые слова: способ, устройство, комбинированная упрочняющая обработка, магнитно-электрическое упрочнение, поверхностная пневмовибродинамическая обработка, качество поверхностных слоев.

Abstract. A device for combined strengthening treatment has been developed, combining magnetic-electric hardening with surface pneumo-vibro-dynamic processing of metal surfaces of non-rigid parts. The paper presents research results on microhardness and coating quality obtained via combined strengthening treatment.

Keywords. method, device, combined hardening treatment, magneto-electric hardening, surface pneumovibrodynamic treatment, quality of surface layers.

Известно [1, 2], что потеря работоспособности агрегатов и узлов авто-тракторной и сельскохозяйственной техники обусловлена преимущест-