

потока в зависимости от текущих условий, обеспечивая стабильный режим сушки. Такая конструкция не только повышает энергоэффективность процесса, но и расширяет возможности применения устройства для различных задач — от научных исследований до практического использования на пасеке.

Список использованной литературы

1. Кривцов, Н. И. Пчеловодство / Н. И. Кривоцов, В. И. Лебедев, Г. М. Туников – М.: Колос, 1999. – 399 с.
2. Комиссар, А. Д. Перга – новый продукт пчеловодства / А. Д. Комиссар, Г. А. Миронов // Пчеловодство. – 1993. – № 3. – С. 42.
3. Космович, Е. К. Перга из выбракованных сотов / Е.К. Космович. // Пчеловодство. – 1981. – № 4–5. – С. 43.
4. Чудаков, В. Г. Технология продуктов пчеловодства / В. Г. Чудаков. – М.: Колос, 1979. – 160 с.
5. Дауренова, И. М. Тойбазар, Д. М. Сапаргали, А. Ж. Хазимов, М. Ж.; Касымбаев, Б. М. Чандра, Б. Г. Эффективная технология и средства переработки пчелиных сотов на пергу и восковое сырье в Казахстане. «Исследования, результаты» 2024, 2, 523-534.

Summary. The developed solar dryer demonstrates a high degree of autonomy and adaptability due to the efficient use of solar energy both for heating the air and for powering the ventilation system. The integration of intelligent control of the fan unit allows dynamic adjustment of the air flow parameters depending on the current conditions, ensuring a stable drying mode. This design not only increases the energy efficiency of the process, but also expands the possibilities of using the device for various tasks - from scientific research to practical use in the apiary.

УДК 621.791.92 : 621.81

Афанасенко Д.Е., аспирант;

Косак А.А., магистрант;

Миранович А.В., кандидат технических наук, доцент

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

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ С ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация В работе выполнена многопараметрическая оптимизация совмещенной комбинированной обработки магнитно-электрического упрочнения с пневмовибродинамической обработкой деталей погружных электронасосов.

Abstract The was performed multiparameter optimization of combined magnetic-electric hardening processing with pneumatic-vibrodynamic processing of submersible electric pump parts.

Ключевые слова предприятия агропромышленного комплекса, насосное оборудование, технологические способы, комбинированная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, композиционный ферромагнитный порошок, износ, производительность.

Keywords agro-industrial complex enterprises, pumping equipment, technological methods, combined processing, magnetic-electric hardening, composite ferromagnetic powder, wear, productivity.

Одними из наиболее используемых на предприятиях АПК агрегатов, работающих в контакте с агрессивными средами, являются погружные электронасосы, для которых характерны тяжелые условия работы: пусковые нагрузки, запескованность скважин, повышенное содержание солей, щелочей и других примесей в воде. Это существенно снижает надежность работы сборочных единиц или отдельных деталей погружных электронасосных агрегатов. При этом достаточно часто электродвигатели выходят из строя в результате механических повреждений и износа рабочей поверхности втулки радиального подшипника и распорной втулки, износа посадочного места вала ротора под втулку подшипника и пята [1, 2].

Анализ наиболее распространенных видов дефектов типовых деталей (например, погружных электродвигателей мод. ПЭДВ-180) являются: износ посадочной поверхности вала ротора под втулку подшипника; износ наружной поверхности втулки подшипника (сопряжение «втулка подшипника вала ротора – резинометаллическая втулка щита»); изгиб вала ротора [3, 4]. Основными способами восстановления деталей погружных электродвигателей являются: вибродуговая наплавка, электроконтактная приварка, наплавка под слоем флюса и в среде защитных газов. Для них характерны такие основные недостатки, как невысокая усталостная прочность наплавляемых деталей, высокое термическое воздействие на деталь и расплавление основного металла [4, 5].

Одним из рациональных способов упрочнения (восстановления) рабочих поверхностей валов ротора под втулку подшипника и наружной поверхности втулки подшипника – совмещенная комбинированная обработка (КМО), реализуемая на одном технологическом оборудовании, посредством магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) с пневмовибродинамической обработкой (ПВДО) и последующей финишной магнитно-абразивной обработкой (МАО) [3, 5, 6].

Следует отметить, что одной из важнейших задач любой технологии является обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах [7, 8]. В соответствии

в работе с целью обеспечения заданных эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностей деталей проведены исследования с применением метода на основе многопараметрической оптимизации режима КМО с использованием детерминированного и стохастического подходов [8, 9].

Анализ априорной информации и проведенные ранее исследования [7, 9–11] показали, что процесс КМО достаточно полно описывается статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице ЦКРУП. В качестве параметров оптимизации МЭУ с ПВДО износостойких покрытий взяты следующие параметры: производительность процесса Q (приращение массы покрытия) и относительная износостойкость покрытия ε . Испытания износостойкости образцов с покрытиями, полученными КМО и обработанных при оптимальных условиях и режимах процессов, проводились на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схемам «диск-колодка» при сравнительной оценке износостойкости покрытий при трении скольжения.

Независимыми переменными приняты следующие факторы: плотность тока i , А/мм²; величина рабочего зазора δ , мм; скорость подачи S , мм/об; окружная скорость заготовки V , м/с; расход композиционного порошка q , г/с·мм². Постоянными взяты факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре $B = 0,7$ Тл; размер зерен композиционного порошка $\Delta = 240\text{--}320$ мкм; расход рабочей жидкости $q = 2,3 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²), давление подачи сжатого воздуха = 0,1 МПа, рабочие тела (шариками радиусом 3 мм), СОЖ – 5%-й раствор товарного эмульсора Э2 в воде. Оптимальный технологический режим КМО определяли для следующих композиционных ферромагнитных порошков (КМП): Н70Х17С4Р4 (1), ПР10Р6М5 (2) и ФБХ-6-2 (3).

Экспериментальные исследования проводили на образцах из стали 45, 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.

Степень влияния технологических факторов КМО на параметры оптимизации Q и ε определяли по величине коэффициентов моделей (1) – (6). Многопараметрическую оптимизацию процесса МЭУ с ПВДО проводили по двум параметрам ($Y_1=Q$, $Y_2=\varepsilon$). Для этого использовали комплексный показатель [6, 7], в качестве которого была принята обобщенная функция желательности Харрингтона [7, 8].

С учетом работ [5, 9] установили условия проведения эксперимента для получения статистических моделей КМО (таблица 1). Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 1 – Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы				
	i, А/мм ²	δ, мм	S, мм/об	V, м/с	q, г/(с·мм ²) · 10 ⁻³
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Основной (0)	1,80	2,00	0,25	0,06	2,50
Верхний (+1)	2,25	2,50	0,35	0,08	2,90
Нижний (-1)	1,35	1,50	0,15	0,04	2,10
Звездная точка (+α)	2,70	3,00	0,45	0,10	3,30
Звездная точка (-α)	0,90	1,00	0,05	0,02	1,70
Интервалы варьирования:					
основной	0,45	0,50	0,10	0,02	0,40
по α	0,90	1,00	0,20	0,04	0,80

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием прикладных программ Mathcad, позволила получить статистические модели, определяющие зависимости производительности процесса КМО Q от технологических факторов.

$$Y_1=Q_{(1)}=212,472+1,196 \cdot X_1-0,377 \cdot X_2-1,513 \cdot X_3-2,103 \cdot X_4+0,975 \cdot X_5-4,529 \cdot X_1 X_2+0,234 \cdot X_1 X_3-5,527 \cdot X_1 X_4-5,268 \cdot X_1 X_5+1,734 \cdot X_2 X_3+4,853 \cdot X_2 X_4-5,537 \cdot X_2 X_5-7,112 \cdot X_3 X_4+0,104 \cdot X_3 X_5-4,757 \cdot X_4 X_5-0,768 \cdot X_1^2-0,513 \cdot X_2^2-0,524 \cdot X_3^2-0,586 \cdot X_4^2-1,629 \cdot X_5^2 ; \quad (1)$$

$$Y_1=Q_{(2)}=218,227+0,946 \cdot X_1-0,403 \cdot X_2-1,385 \cdot X_3-1,987 \cdot X_4+0,298 \cdot X_5-3,858 \cdot X_1 X_2-0,101 \cdot X_1 X_3^*-4,057 \cdot X_1 X_4-5,058 \cdot X_1 X_5-1,248 \cdot X_2 X_3+4,817 \cdot X_2 X_4-4,027 \cdot X_2 X_5-5,849 \cdot X_3 X_4+0,108 \cdot X_3 X_5-4,983 \cdot X_4 X_5-0,886 \cdot X_1^2-0,481 \cdot X_2^2-0,279 \cdot X_3^2-0,491 \cdot X_4^2-1,539 \cdot X_5^2 ; \quad (2)$$

$$Y_1=Q_{(3)}=223,876+1,234 \cdot X_1-0,423 \cdot X_2-1,610 \cdot X_3-2,019 \cdot X_4+0,732 \cdot X_5-5,102 \cdot X_1 X_2+0,108 \cdot X_1 X_3^*+4,543 \cdot X_1 X_4+5,516 \cdot X_1 X_5+1,824 \cdot X_2 X_3+5,521 \cdot X_2 X_4-4,511 \cdot X_2 X_5-6,012 \cdot X_3 X_4+0,114 \cdot X_3 X_5-5,126 \cdot X_4 X_5-0,986 \cdot X_1^2-0,544 \cdot X_2^2-0,303 \cdot X_3^2-0,622 \cdot X_4^2-0,977 \cdot X_5^2 . \quad (3)$$

Модели, определяющие характер зависимости относительной износостойкости покрытия ε от технологических факторов КМО для исследуемых порошков, представлены ниже.

$$Y_2 = \varepsilon_{(3)} = 1,953 + 0,123 \cdot X_1 + 0,029 \cdot X_2 - 0,198 \cdot X_3 - 0,112 \cdot X_4^* - 0,031 \cdot X_5 + 0,114 \cdot X_1 X_2 - 0,571 \cdot X_1 X_3 + 0,119 \cdot X_1 X_4 - 0,091 \cdot X_1 X_5 - 0,266 \cdot X_2 X_3 + 0,081 \cdot X_2 X_4 + 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,193 \cdot X_3 X_4 + 0,014 \cdot X_3 X_5 + 0,217 \cdot X_4 X_5^* - 0,098 \cdot X_1^2 - 0,024 \cdot X_2^2 - 0,034 \cdot X_3^2 - 0,041 \cdot X_4^2 - 0,014 \cdot X_5^2. \quad (4)$$

$$Y_2 = \varepsilon_{(2)} = 2,264 + 0,179 \cdot X_1 - 0,018 \cdot X_2 - 0,204 \cdot X_3 - 0,108 \cdot X_4^* - 0,047 \cdot X_5 + 0,187 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3^* - 0,101 \cdot X_1 X_4 - 0,207 \cdot X_1 X_5 - 0,217 \cdot X_2 X_3 + 0,113 \cdot X_2 X_4 - 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,115 \cdot X_3 X_4 + 0,095 \cdot X_3 X_5 + 0,277 \cdot X_4 X_5 - 0,081 \cdot X_1^2 - 0,015 \cdot X_2^2 - 0,083 \cdot X_3^2 - 0,069 \cdot X_4^2 - 0,021 \cdot X_5^2; \quad (5)$$

$$Y_2 = \varepsilon_{(3)} = 2,137 + 0,165 \cdot X_1 + 0,028 \cdot X_2 - 0,187 \cdot X_3 - 0,091 \cdot X_4 - 0,035 \cdot X_5 + 0,151 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3 + 0,158 \cdot X_1 X_4 - 0,177 \cdot X_1 X_5 - 0,315 \cdot X_2 X_3 + 0,068 \cdot X_2 X_4 - 0,144 \cdot X_2 X_5 - 0,181 \cdot X_3 X_4 + 0,075 \cdot X_3 X_5^* - 0,212 \cdot X_4 X_5 - 0,102 \cdot X_1^2 - 0,019 \cdot X_2^2 - 0,059 \cdot X_3^2 - 0,026 \cdot X_4^2 - 0,028 \cdot X_5^2; \quad (6)$$

Выявлено, что не все коэффициенты регрессии (1) – (6) значимы с 95%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (* – коэффициент не значим). Также установлено, что математические модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера. Таким образом, получены модели процесса КМО, которые позволяют установить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальный режим МЭУ с ПВДО.

Из анализа статистических моделей (1) – (6) и данных таблицы 2 следует, что в порядке убывания значимости факторы по влиянию на исследуемые параметры можно расположить в следующие ряды:

$$Y_1 = Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta; \quad Y_2 = \varepsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta.$$

Наибольшее влияние на производительность процесса КМО Q оказывает окружная скорость заготовки V и скорость продольной подачи S . Далее в порядке убывания следуют плотность разрядного тока i , расход композиционного порошка q , величина рабочего зазора δ . На относительную износостойкость ε оказывает значительное влияние скорость продольной подачи, плотность разрядного тока i . Затем по степени значимости располагаются в ряд окружная скорость заготовки V , величина рабочего зазора δ и расход КМП q (таблица 2).

Исследованиями установлено, что влияние скоростей V и S на производительность процесса и относительную износостойкость самое большое из всех рассматриваемых технологических факторов, при изменении подачи в пределах от 0,05 до 0,25 мм/об и окружной скорости от 0,02 до 0,06 м/с они оказывают значительное влияние на эксплуатационные показатели. Однако при дальнейшем увеличении более

0,35 мм/об и 0,08 м/с происходит заметное ухудшение производительности процесса КМО и относительной износостойкости. Оптимальными параметрами являются продольная подача и окружная скорость, при которых удовлетворяются следующие условия: $0,04 < V < 0,06$ м/с; $0,15 < S < 0,25$ мм/об.

Таблица 2 – Влияние технологических факторов на параметры МЭУ с ПВДО

Технологические факторы	Степень влияния факторов на параметры оптимизации, %					
	$Y_1=Q$			$Y_2=\varepsilon$		
	Н70Х1 7С4Р4	ПР10Р 6М5	ФБХ- 6-2	Н70Х1 7С4Р4	ПР10Р 6М5	ФБХ- 6-2
Плотность разрядного тока, i	19,09	19,37	19,31	32,62	32,12	24,99
Величина рабочего зазора, δ	6,46	7,96	6,34	5,51	3,23	5,84
Скорость продольной подачи, S	25,30	27,47	24,33	36,84	36,69	40,16
Окружная скорость заготовки, V	31,63	36,22	34,19	17,98	19,42	22,77
Расход композиционного порошка, q	17,52	8,98	15,83	7,05	8,54	6,24

Плотность разрядного тока оказывает значительное влияние, как на относительную износостойкость, так и на производительность процесса КМО. При увеличении плотности разрядного тока производительность процесса возрастает, так как нагрев и расплавление цепочек-микроэлектродов порошка возрастает за счет преобразования электрической энергии в тепловую. Вместе с тем, при превышении максимального значения плотности тока производительность снижается, так как повышается вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника. Оптимальные значения плотности разрядного тока i для исследуемых КМП находятся в пределах $1,7 < i < 2,0$ А/мм².

Наиболее благоприятные значения расхода КМП, обеспечивающие наибольшую производительность и относительную износостойкость покрытий, следующие: $qQ_1 = 2,78 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $qQ_2 = 2,74 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $qQ_3 = 2,73 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²) и $q\varepsilon_1 = 2,84 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $q\varepsilon_2 = 2,85 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $q\varepsilon_3 = 2,92 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²).

Из приведенных данных установлено, что значения расхода КМП отличаются незначительно. Рабочий зазор – технологический фактор, от

которого зависит количество зерен порошка в цепочке-микроэлектроде и, следовательно, в определенной степени производительность и относительная износостойкость. Количество передаваемой энергии композиционному порошку и перенос материала порошка на обрабатываемую деталь вследствие этого снижается. При увеличении рабочего зазора снижаются производительность и износостойкость из-за значительной длины цепочек-микроэлектродов. Анализ статистических моделей показывает, что рабочий зазор находится в пределах $1,5 < \delta < 2,5$ мм.

Исследованиями установлено, что значения оптимальных режимов КМО имеют незначительные отличия (таблица 3), а по некоторым факторам почти совпадают.

Таблица 3 – Оптимальные значения режима МЭУ с ПВДО

КМП	Оптимальные значения факторов				
	i , А/мм ²	δ , мм	S , мм/об	V , м/с	q , г/(с·мм ²)
H70X17C4P4	1,89	1,59	0,187	0,058	$2,91 \cdot 10^{-3}$
ПР10Р6М5	1,76	2,25	0,219	0,051	$2,96 \cdot 10^{-3}$
ФБХ-6-2	1,95	1,57	0,223	0,057	$2,99 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, с помощью многопараметрической оптимизации и принятых ограничений для КМО различных КМП, можно рекомендовать следующий режим: $i = 1,76 - 1,91$ А/мм²; $\delta = 1,57 - 2,25$ мм; $S = 0,187 - 0,223$ мм/об; $V = 0,051 - 0,058$ м/с; $q = (2,91 - 2,99) \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²).

Список использованной литературы

23. Козорез, А.С. Скважинные электронасосные агрегаты с синхронными электродвигателями на постоянных магнитах / А.С. Козорез и др. ; под общей ред. В.О. Китикова НАН Беларуси, Институт жилищно-коммунального хозяйства. – Минск : Беларуская навука, 2023. – 162 с.

24. Козорез, А.С. Эксплуатация и технический сервис. Погружные скважинные электронасосные агрегаты / А.С. Козорез, В.С. Ивашко. – Минск: Изд-во РУП «Институт энергетики АПК НАН Беларуси», 2006. – 186 с.

25. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

26. Козорез, А.С. Повышение надежности погружных скважинных электронасосных агрегатов применением новых материалов и износостойких покрытий / А. С. Козорез и др. – Минск: Народная книга, 2008. – 307 с.

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

28. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель : ИММС НАНБ, 1999. 276 с.

29. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Высшая школа, 1985. – 236 с.
30. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
31. Акулович Л.М., Миранович А.В. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники. Минск : БГАТУ, 2016. 236 с.
32. Финишная обработка поверхностей / С.А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 377 с.

Summary. By means of multiparameter optimization and accepted limitations for combined processing by magnetic-electric hardening with pneumatic-vibrodynamic processing of electric pump parts, the following mode is recommended: $i = 1.76 - 1.91 \text{ A/mm}^2$; $\delta = 1.57 - 2.25 \text{ mm}$; $S = 0.187 - 0.223 \text{ mm/rev}$; $V = 0.051 - 0.058 \text{ m/s}$; $q = (2.91 \dots 2.99) 10^{-3} \text{ g/(s mm}^2\text{)}$.

УДК 631.363.1; 636.085.522.55

Жумагалиев Е.Р.^{1, 2}, магистр технических наук;

Тайлер И.А.², магистр сельского хозяйства;

Хазимов К.М.², PhD, ассоциированный профессор;

Ниязбаев А.К.², PhD, ассоциированный профессор;

Хазимов М.Ж.², кандидат технических наук, профессор

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический

университет» имени К.И.Сатпаева», г. Алматы, Республика Казахстан

²НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет»,

г. Алматы, Республика Казахстан

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА И РАСЧЕТ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА МАШИН ДЛЯ УБОРКИ СИЛОСА В ХОЗЯЙСТВЕ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы комплектации транспортно-тракторного агрегата для заготовки силоса на сельскохозяйственном предприятии. Представлен расчет необходимого количества машин для обеспечения эффективной и своевременной заготовки силоса с учетом агротехнических сроков, производительности оборудования и особенностей фермы. Особое внимание уделяется выбору оптимального состава агрегатов с целью повышения производительности, сокращения времени простоя и обеспечения рационального использования материально-технических ресурсов. Полученные результаты могут быть использованы при планировании технологических процессов заготовки кормов и модернизации транспортно-тракторного парка.

Abstract. The paper considers the issues of completing a transport tractor unit for silage harvesting in an agricultural enterprise. The calculation of the required number of machines is presented to ensure efficient and timely silage harvesting, taking into account agrotechnical deadlines, equipment productivity and farm characteristics. Special attention is paid to choosing the optimal composition of units in order to