

**Определение оптимальных режимов электромагнитной наплавки износостойких покрытий на детали электродвигателей погружных водяных насосов**

**Акулович Л. М., профессор, д.т.н., Лойко В.А., доцент, к.т.н.,**

**Миранович А. В., инженер**

*(Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»)*

*В статье выполнена многопараметрическая оптимизация режимов электромагнитной наплавки износостойких покрытий на детали электродвигателей погружных водяных насосов.*

Известно [1], что одними из наиболее широко используемых на предприятиях АПК машин, работающих в контакте с агрессивными средами, являются погружные электронасосы, для которых характерны такие тяжелые условия работы, как пусковые нагрузки, запескованность скважин, повышенное содержание солей, щелочей и других примесей в воде. Все это существенно снижает надежность работы сборочных единиц и отдельных деталей погружных электронасосных агрегатов.

Установлено, что наиболее распространенными видами дефектов типовых деталей погружных электродвигателей модели ПЭДВ 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. Известно [2], что 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 высокое термическое воздействие на деталь и расплавление основного металла и, как следствие, невысокая усталостная прочность восстанавливаемых деталей [3].

Согласно проведенным расчетам [4] одним из рациональных способов восстановления рабочих поверхностей валов ротора под втулку подшипника и наружной поверхности втулки подшипника – наплавка в электромагнитном поле. Основные преимущества наплавки – минимальное тепловыделение и расплавление материала основы, отсутствие деформации обрабатываемой детали, высокая прочность сцепления нанесенного слоя с основой, отсутствие необходимости специальной предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей. При этом присутствует возможность осуществления процесса на одном оборудовании с финишной обработкой – магнитно-абразивной (МАО) [4, 5].

Одной из важнейших задач любой технологии является обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах [4, 6]. Отсюда следует заключение о необходимости использования двух критериев оптимальности: максимальной производительности и минимальной себестоимости. В данной работе с целью обеспечения заданных эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностей деталей проведены исследования с применением метода на основе многопараметрической оптимизации режима наплавки с использованием детерминированного и стохастического подходов [5 ... 7].

Анализ априорной информации и проведенные ранее исследования [4, 5] показали, что процесс наплавки в электромагнитном поле достаточно полно описывается статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице ЦКРУП. В качестве параметров оптимизации наплавки износостойких покрытий взяты следующие параметры: производительность процесса  $Q$  (приращение массы покрытия) и относительная износостойкость покрытия  $\varepsilon$ . Испытания износостойкости образцов с покрытиями, полученными электромагнитной наплавкой и обработанных при оптимальных условиях и

режимах процессов, проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224 – 86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей» 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 разрядного тока  $i$ , А/мм<sup>2</sup>; величина рабочего зазора  $\delta$ , мм; скорость подачи  $S$ , мм/об; окружная скорость заготовки  $V$ , м/с; расход композиционного порошка  $q$ , г/с·мм<sup>2</sup>. Постоянными взяты факторы: магнитная индукция в рабочем зазоре  $B = 0,25$  Тл; размер зерен композиционного порошка  $\Delta = 240 \dots 320$  мкм; расход рабочей жидкости  $q = 2,3 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>), СОЖ – 5%-й раствор товарного эмульсола Э2 в воде. Оптимальный технологический режим наплавки установкой с постоянными магнитами определяли для следующих композиционных порошков: ФБХ-6-2, Х18ФН2М и Fe-5%V.

Выбор вышеуказанных материалов для сравнения эффективности нанесения покрытий обусловлен тем, что: сплав ФБХ 6-2 обеспечивает получение покрытий, сохраняющих высокую твердость, плотность и износостойкость до температуры, не превышающей 550 °С в сопряжениях пар трения; многокомпонентный композиционный порошок Х18ФН2М позволяет получить покрытия с достаточно высокой твердостью и высокими триботехническими свойствами; сплав Fe – 5%V имеет небольшое количество легирующих компонентов и при наплавке образует устойчивые твердые карбиды ванадия с углеродом, а также упрочняет твердый раствор интерметаллидными фазами.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из стали 45 ГОСТ 1050-88, 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 наплавки на параметры оптимизации  $Q$  и  $\varepsilon$  определяли по величине коэффициентов моделей (1) ... (6).

Для этого из общей модели для параметра оптимизации составлялось уравнение регрессии с двумя переменными. При этом в уравнении аргументом служит один из факторов, а функцию отклика выполняет параметр оптимизации. Оставшиеся факторы фиксируются на нулевом уровне.

Многопараметрическую оптимизацию процесса наплавки в электромагнитном поле проводили по двум параметрам ( $Y_1=Q$ ,  $Y_2=\epsilon$ ). Для этого использовали комплексный показатель [4, 5], в качестве которого была принята обобщенная функция желательности Харрингтона [6].

С учетом работ [4, 5] определили условия выполнения эксперимента для получения статистических моделей нанесения износостойких покрытий электромагнитной наплавкой (табл. 1). Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 1. Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы				
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/с	$q$ , г/(с·мм <sup>2</sup> ) · 10 <sup>-3</sup>
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Основной (0)	1,80	2,00	0,25	0,06	2,55
Верхний (+1)	2,20	2,50	0,35	0,08	3,00
Нижний (-1)	1,40	1,50	0,15	0,04	2,10
Звездная точка (+ $\alpha$ )	2,60	3,00	0,45	0,10	3,45
Звездная точка (- $\alpha$ )	1,00	1,00	0,05	0,02	1,65
Интервалы варьирования:					
основной	0,40	0,50	0,10	0,02	0,45
по $\alpha$	0,80	1,00	0,20	0,04	0,90

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием прикладных программ Mathcad 2002 и Excel пакета MS Office, работающих в среде Windows, позволила получить статистические модели, определяющие зависимости производительности процесса наплавки  $Q$  от технологических факторов.

$$\begin{aligned}
Y_1=Q_{\text{ФБХ-6-2}} &= 223,936 + 1,214 \cdot X_1 - 0,412 \cdot X_2 - 1,610 \cdot X_3 - 2,015 \cdot X_4 + 0,712 \cdot X_5 - \\
&- 5,102 \cdot X_1 X_2 + 0,108 \cdot X_1 X_3^* + 4,541 \cdot X_1 X_4 + 5,516 \cdot X_1 X_5 + 1,824 \cdot X_2 X_3 + 5,521 \cdot X_2 X_4 - \\
&- 4,511 \cdot X_2 X_5 - 6,012 \cdot X_3 X_4 + 0,114 \cdot X_3 X_5 - 5,106 \cdot X_4 X_5 - 0,986 \cdot X_1^2 - 0,514 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,313 \cdot X_3^2 - 0,603 \cdot X_4^2 - 0,997 \cdot X_5^2;
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
Y_1=Q_{\text{X18ФН2М}} &= 218,373 + 0,983 \cdot X_1 - 0,407 \cdot X_2 - 1,381 \cdot X_3 - 1,987 \cdot X_4 + 0,295 \cdot X_5 - \\
&- 3,855 \cdot X_1 X_2 - 0,103 \cdot X_1 X_3^* - 4,057 \cdot X_1 X_4 - 5,056 \cdot X_1 X_5 - 1,248 \cdot X_2 X_3 + 4,877 \cdot X_2 X_4 - \\
&- 4,029 \cdot X_2 X_5 - 5,849 \cdot X_3 X_4 + 0,108 \cdot X_3 X_5 - 4,983 \cdot X_4 X_5 - 0,886 \cdot X_1^2 - 0,481 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,276 \cdot X_3^2 - 0,498 \cdot X_4^2 - 1,509 \cdot X_5^2;
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
Y_1=Q_{\text{Fe-5\%V}} &= 212,456 + 1,194 \cdot X_1 - 0,387 \cdot X_2 - 1,503 \cdot X_3 - 2,103 \cdot X_4 + 0,975 \cdot X_5 - \\
&- 4,529 \cdot X_1 X_2 + 0,234 \cdot X_1 X_3 - 5,527 \cdot X_1 X_4 - 5,268 \cdot X_1 X_5 + 1,714 \cdot X_2 X_3 + 4,853 \cdot X_2 X_4 - \\
&- 5,537 \cdot X_2 X_5 - 7,012 \cdot X_3 X_4 + 0,104 \cdot X_3 X_5 - 4,737 \cdot X_4 X_5 - 0,768 \cdot X_1^2 - 0,523 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,524 \cdot X_3^2 - 0,586 \cdot X_4^2 - 1,629 \cdot X_5^2.
\end{aligned} \tag{3}$$

Модели, определяющие характер зависимости относительной износостойкости покрытия  $\varepsilon$  от технологических факторов наплавки в электромагнитном поле для исследуемых порошков, представлены ниже.

$$\begin{aligned}
Y_2=\varepsilon_{\text{ФБХ-6-2}} &= 2,137 + 0,165 \cdot X_1 + 0,028 \cdot X_2 - 0,187 \cdot X_3 - 0,091 \cdot X_4 - 0,035 \cdot X_5 + \\
&+ 0,151 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3 + 0,158 \cdot X_1 X_4 - 0,177 \cdot X_1 X_5 - 0,315 \cdot X_2 X_3 + 0,068 \cdot X_2 X_4 - \\
&- 0,144 \cdot X_2 X_5 - 0,181 \cdot X_3 X_4 - 0,075 \cdot X_3 X_5^* - 0,212 \cdot X_4 X_5 - 0,102 \cdot X_1^2 - 0,019 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,059 \cdot X_3^2 - 0,026 \cdot X_4^2 - 0,028 \cdot X_5^2;
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
Y_2=\varepsilon_{\text{X18ФН2М}} &= 2,262 + 0,179 \cdot X_1 - 0,017 \cdot X_2 - 0,201 \cdot X_3 - 0,106 \cdot X_4^* - 0,047 \cdot X_5 + \\
&+ 0,189 \cdot X_1 X_2 - 0,651 \cdot X_1 X_3^* - 0,101 \cdot X_1 X_4 - 0,207 \cdot X_1 X_5 - 0,217 \cdot X_2 X_3 + 0,115 \cdot X_2 X_4 - \\
&- 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,115 \cdot X_3 X_4 + 0,095 \cdot X_3 X_5 + 0,277 \cdot X_4 X_5 - 0,081 \cdot X_1^2 - 0,015 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,083 \cdot X_3^2 - 0,069 \cdot X_4^2 - 0,021 \cdot X_5^2;
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
Y_2=\varepsilon_{\text{Fe-5\%V}} &= 1,953 + 0,123 \cdot X_1 + 0,029 \cdot X_2 - 0,198 \cdot X_3 - 0,112 \cdot X_4^* - 0,031 \cdot X_5 + \\
&+ 0,114 \cdot X_1 X_2 - 0,571 \cdot X_1 X_3 + 0,119 \cdot X_1 X_4 - 0,091 \cdot X_1 X_5 - 0,266 \cdot X_2 X_3 + 0,081 \cdot X_2 X_4 + \\
&+ 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,193 \cdot X_3 X_4 + 0,014 \cdot X_3 X_5 + 0,217 \cdot X_4 X_5^* - 0,098 \cdot X_1^2 - 0,024 \cdot X_2^2 - \\
&- 0,034 \cdot X_3^2 - 0,041 \cdot X_4^2 - 0,014 \cdot X_5^2.
\end{aligned} \tag{6}$$

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 наплавки (1) ... (6), которые позволяют установить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальный режим наплавки покрытия.

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 наплавки 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 композиционного порошка q (табл. 2).

Таблица 2. Влияние технологических факторов на параметры наплавки в электромагнитном поле

Технологические факторы	Степень влияния факторов на параметры оптимизации, %					
	Y <sub>1</sub> =Q			Y <sub>2</sub> =ε		
	ФБХ-6-2	X18ФН2 М	Fe-5% V	ФБХ-6-2	X18ФН2 М	Fe-5% V
Плотность разрядного тока, i.	19,07	19,49	19,37	32,6	32,12	24,95
Величина рабочего зазора, δ	6,48	7,96	6,28	5,53	3,23	5,88
Скорость продольной подачи, S	25,30	27,35	24,39	36,96	36,69	40,16
Окружная скорость заготовки, V	31,67	36,27	34,13	17,98	19,42	22,71
Расход порошка, q	17,48	8,93	15,83	6,93	8,54	6,29

Плотность разрядного тока оказывает значительное влияние, как на относительную износостойкость, так и на производительность процесса. Так при увеличении плотности разрядного тока производительность возрастает, так как нагрев и расплавление цепочек-микроэлектродов порошка возрастает за счет преобразования электрической энергии в тепловую. Однако при превышении максимального значения плотности тока производительность снижается, так как согласно [4] повышается вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника из-за увеличения коэффициента передачи энергии. Оптимальные значения плотности разрядного тока  $i$  для исследуемых ферропорошков находятся в пределах  $1,7 < i < 2,0$  А/мм<sup>2</sup>.

Наиболее благоприятные значения расхода порошков, обеспечивающие наибольшую производительность и относительную износостойкость покрытия, следующие:  $qQ_{\text{ФБХ-6-2}} = 2,81 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>);  $qQ_{\text{X18ФН2М}} = 2,75 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>);  $qQ_{\text{Fe-5\%V}} = 2,73 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>) и  $q\varepsilon_{\text{ФБХ-6-2}} = 2,92 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>);  $q\varepsilon_{\text{X18ФН2М}} = 2,86 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>);  $q\varepsilon_{\text{Fe-5\%V}} = 2,84 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>).

Исследованиями установлено, что при малых значениях рабочего зазора влияние последнего на эксплуатационные параметры незначительно. Объясняется это тем, что образуется большое количество цепочек-электродов за счет удержания постоянным магнитным полем порошка в рабочем зазоре.

С учетом ограничений технологических факторов наплавки, определены варианты режимов нанесения покрытий для исследуемых композиционных порошков. Обработку данных производили с использованием пакета прикладных программ Mathcad 2002 и Excel пакета MS Office, работающих в среде Windows. Приняли режим наплавки за оптимальный, который имеет наибольшую желательность.

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

Таблица 3. Оптимальные значения режима наплавки композиционных порошков

Исследуемый порошок	Оптимальные значения факторов				
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/с	$q$ , г/(с·мм <sup>2</sup> )
ФБХ-6-2	1,87	1,55	0,185	0,057	$2,95 \cdot 10^{-3}$
X18ФН2М	1,93	1,54	0,228	0,056	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Fe-5%V	1,73	2,21	0,276	0,053	$2,86 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, с помощью многопараметрической оптимизации и принятых ограничений для наплавки различных композиционных порошков, можно рекомендовать следующий режим:  $i = 1,73 \dots 1,91$  А/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 1,50 \dots 2,21$  мм;  $S = 0,185 \dots 0,276$  мм/об;  $V = 0,055 \dots 0,057$  м/с;  $q = (2,86 \dots 2,95) \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>).

#### Список литературы:

- 1 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.
- 2 Лялякин, В. П. Современные методы восстановления и упрочнения деталей машин / В. П. Лялякин. – М.: Машиностроение, 1988. – 42 с.
- 3 Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин и др.; под общ. ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
- 4 Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
- 5 Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
- 6 Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, 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.



## **Анотація**

### **Визначення оптимальних режимів електромагнітної наплавлення зносостійких покриттів на деталі заглибних електродвигунів водяних насосів**

Акулович Л. М., Лойко В.А., Миранович А. В.

*У статті виконана багато параметричне оптимізація режимів електромагнітної наплавлення зносостійких покриттів на деталі заглибних електродвигунів водяних насосів.*

## **Abstract**

### **Definition of optimum conditions of an electromagnetic welding of antiwear coatings on a details of electric motors water pumps**

L.M. Akulovich, V.A. Loyko, A.V. Miranovich

*In article multiple parametre optimisation of conditions of an electromagnetic welding of antiwear coatings on a detail of electric motors water pumps is executed.*