

ОПТИМИЗАЦИЯ НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В ПЕРЕМЕННОМ И ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*Акулович Л.М., д.т.н., профессор; Миранович А.В., инженер
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск*

В процессе работы большинство деталей сельскохозяйственной техники подвергается динамическим нагрузкам, абразивному износу и химическому воздействию внешней среды, вследствие чего они быстро теряют свои первоначальные качества [1, 2]. Известно, что основными способами восстановления деталей сельскохозяйственной техники являются: наплавка под слоем флюса и в среде защитных газов, вибродуговая наплавка, электроконтактная приварка [3]. При этом одним из рациональных способов повышения износостойкости посадочных поверхностей деталей автотракторной техники является наплавка в электромагнитном поле. Основными преимуществами наплавки являются: высокая прочность сцепления нанесенного слоя с основой, минимальное тепловыделение и расплавление материала основы, отсутствие деформации обрабатываемой детали и небольшие припуски на последующую механическую обработку, не оказывает влияния на основную структуру металла, отсутствие необходимости специальной предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей, простота эксплуатации наплавочного оборудования, экологическая чистота, технологическая безопасность. Возможность осуществления процесса на одном оборудовании с финишной обработкой – магнитно-абразивной (МАО) [4, 5].

Известно, что одной из важнейших задач любого технологического метода является обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах [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 [7].

Анализ априорной информации и проведенные ранее исследования показали, что процесс наплавки в электромагнитном поле достаточно

полно описывается статистическими моделями второго порядка, полученными по матрице ЦКРУП [5]. В качестве параметров оптимизации наплавки износостойких покрытий взяты следующие параметры: производительность процесса Q (приращение массы покрытия) и относительная износостойкость покрытия ϵ . Испытания износостойкости образцов с покрытиями, полученными 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/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 $B = 0,20$ Тл; размер зерен композиционного порошка $\Delta = 240 \dots 320$ мкм; расход рабочей жидкости $q = 2,3 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²), СОЖ – 5%-й раствор товарного эмульсола Э2 в воде. Оптимальный технологический режим наплавки установкой с постоянными магнитами определяли для следующих порошков: ФБХ-6-2, Н70Х17С4Р4 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 Н70Х17С4Р4 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 (рис. 1), 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 ϵ 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.

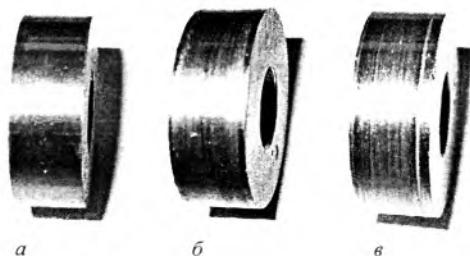


Рис. 1. Фотографии образцов из стали 45, использовавшихся при исследовании эксплуатационных свойств покрытий: а – до начала испытаний износостойкости; б – после приработки с образцом; в – после окончания

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

С учетом работ [4, 5] установили условия проведения эксперимента для получения статистических моделей нанесения износостойких покрытий 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 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	2,55
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 (+ α)	2,60	3,00	0,45	0,10	3,45
Звездная точка (- α)	1,00	1,00	0,05	0,02	1,65
Интервалы варьирования:					
основной					
по α	0,40	0,50	0,10	0,02	0,45
	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.

$$Y_1=Q_{\text{ФВХ-6-2}}=223,936+1,214 \cdot X_1-0,412 \cdot X_2-1,610 \cdot X_3-2,015 \cdot X_4+0,712 \cdot X_5 \quad (1)$$

$$-5,102 \cdot X_1 X_2 + 0,108 \cdot X_1 X_3^* + 4,541 \cdot X_1 X_4 + 5,516 \cdot X_1 X_5 + 1,824 \cdot X_2 X_3 + \\ + 5,521 \cdot X_2 X_4 - 4,511 \cdot X_2 X_5 - 6,012 \cdot X_3 X_4 + 0,114 \cdot X_3 X_5 - 5,106 \cdot X_4 X_5 - \\ 0,986 \cdot X_1^2 - 0,514 \cdot X_2^2 - 0,313 \cdot X_3^2 - 0,603 \cdot X_4^2 - 0,997 \cdot X_5^2;$$

$$Y_i = Q_{H70X17C4P4} = 218,375 + 0,986 \cdot X_1 - 0,403 \cdot X_2 - 1,384 \cdot X_3 - \\ - 1,987 \cdot X_4 + 0,298 \cdot X_5 - 3,858 \cdot X_1 X_2 - 0,101 \cdot X_1 X_3^* - 4,057 \cdot X_1 X_4 - 5,058 \cdot X_1 X_5 - \\ - 1,248 \cdot X_2 X_3 + 4,879 \cdot X_2 X_4 - 4,027 \cdot X_2 X_5 - 5,849 \cdot X_3 X_4 + 0,108 \cdot X_3 X_5 - \\ - 4,983 \cdot X_4 X_5 - 0,886 \cdot X_1^2 - 0,481 \cdot X_2^2 - 0,276 \cdot X_3^2 - 0,498 \cdot X_4^2 - 1,509 \cdot X_5^2; \quad (2)$$

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

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

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

$$Y_2 = \varepsilon_{H70X17C4P4} = 2,264 + 0,179 \cdot X_1 - 0,018 \cdot X_2 - 0,204 \cdot X_3 - 0,108 \cdot X_4^* - \\ - 0,047 \cdot X_5 + 0,187 \cdot X_1 X_2 - 0,655 \cdot X_1 X_3^* - 0,101 \cdot X_1 X_4 - 0,207 \cdot X_1 X_5 - \\ - 0,217 \cdot X_2 X_3 + 0,113 \cdot X_2 X_4 - 0,203 \cdot X_2 X_5 - 0,095 \cdot X_3 X_5 + 0,277 \cdot X_4 X_5 - \\ - 0,115 \cdot X_3 X_4 + 0,081 \cdot X_1^2 - 0,015 \cdot X_2^2 - 0,083 \cdot X_3^2 - 0,069 \cdot X_4^2 * - 0,021 \cdot X_5^2 *; \quad (5)$$

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

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 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).

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 наплавки 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 наплавки в электромагнитном поле

Технологические факторы	Степень влияния факторов на параметры оптимизации, %					
	Y ₁ =Q			Y ₂ =ε		
	ФБХ-6-2	H70X17 C4P4	Fe-5%V	ФБХ-6-2	H70X17 C4P4	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 композиционного 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 [5] 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/мм².

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·мм²); $qQ_{\text{П70Х17С4Р4}} = 2,75 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $qQ_{\text{Fe-5\%V}} = 2,73 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²) и $q\epsilon_{\text{ФБХ-6-2}} = 2,92 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $q\epsilon_{\text{П70Х17С4Р4}} = 2,85 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); $q\epsilon_{\text{Fe-5\%V}} = 2,84 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²).

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.

Из приведенных данных следует, что значения расхода композиционных порошков 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 большой длины цепочек-микроэлектродов. Анализ статистических моделей (1)...(6) показывает, что рабочий зазор находится в пределах $1,5 < \delta < 2,5$ мм.

С учетом ограничений технологических факторов наплавки, определены варианты режимов нанесения покрытий для исследуемых композиционных порошков (табл. 3–6). 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. 6), а по некоторым факторам почти совпадают.

Таблица 3 – Поиск оптимального режима наплавки порошка ФБХ-6-2

Номер варианта	Кодированные значения варьируемых факторов					Значения параметров оптимизации		Желательность D
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₂	
1	-0,056	0,56	0,393	-0,141	-0,169	223,518	2,099	0,757
2	0,170	-1,106	-0,649	-0,139	1,030	235,475	2,196	0,856

Таблица 4 – Поиск оптимального режима наплавки порошка H70X17C4P4

Номер варианта	Кодированные значения варьируемых факторов					Значения параметров оптимизации		Желательность D
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₂	
1	0,156	-0,962	-1,944	0,164	0,782	219,944	2,072	0,747
2	0,279	-1,119	-0,303	-0,231	0,702	223,583	2,306	0,863

Таблица 5 – Поиск оптимального режима наплавки порошка Fe-5%V

Номер варианта	Кодированные значения варьируемых факторов					Значения параметров оптимизации		Желательность D
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₂	
1	-0,242	0,529	0,282	-0,135	-0,003	212,138	1,872	0,735
2	-0,436	0,425	0,263	-0,365	0,693	212,905	1,911	0,793

Таблица 6 – Оптимальные значения режима наплавки композиционных порошков

Исследуемый порошок	Оптимальные значения факторов				
	t, А/мм ²	δ, мм	S, мм/об	V, м/с	q, г/(с мм ²)
ФБХ-6-2	1,87	1,55	0,185	0,057	2,95·10 ⁻³
H70X17C4P4	1,91	1,50	0,220	0,055	2,86·10 ⁻³
Fe-5%V	1,73	2,21	0,276	0,053	2,86·10 ⁻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/мм²; $\delta = 1,50 \dots 2,21$ 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 мм²).

Список использованных источников

1. Вопросы земледельческой механики / Под ред. М.Е. Малеपुरо. – Минск, 1963. – 354 с.
3. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И.И. Беркович [и др.]; под общ. ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: СГУ, 2000. – 268 с.
4. Лялякин, В.П. Современные методы восстановления и упрочнения деталей машин / В.П. Лялякин. – М.: Машиностроение, 1988. – 42 с.
5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
6. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
7. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Г.И. Махаринский. – Минск: Высшая школа, 1985. – 236 с.
8. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.