

УДК 621.791.92

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5Ф3, ПОЛУЧЕННЫМ НАПЛАВКОЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*д-р техн. наук, проф. Л.М. КОЖУРО, канд. техн. наук, доц. Т.К. РОМАНОВА  
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

*Представлена комплексная оптимизация комбинированного метода электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием покрытия, полученного нанесением порошка из быстрорежущей стали Р6М5Ф3.*

Электромагнитная наплавка (ЭМН) использует явление расплавления зерен ферромагнитного порошка разрядами электрического тока и полярного переноса капель расплава на упрочняемую или восстанавливаемую поверхность в постоянном магнитном поле [1]. Совместное применение электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет использовать технологическое тепло, выделяющееся при наплавке, что дает возможность объединить операции нанесения и термодеформационного упрочнения покрытия [2]. Такая комбинация двух технологических операций создает условия для формирования износостойкого поверхностного слоя детали [1,2].

Для получения математических моделей ЭМН с ППД порошка Р6М5Ф3 применили центральный композиционный ротатбельный равномер-план (ЦКРУП) второго порядка [3]. Анализ априорной информации и проведенные исследования [4, 5] показали, что процесс ЭМН достаточно полно описывается математическими моделями второго порядка, в качестве параметров оптимизации ЭМН с ППД целесообразно принимать эксплуатационные и технологические показатели: относительную износостойкость  $s$ , среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности  $Ra$  и производительность нанесения покрытия  $G$ .

В качестве независимых переменных следует принимать основные технологические факторы: усилие деформирования  $P$ ,  $H$ ; скорость подачи  $S$ , мм/об; скорость главного движения  $V$ , м/с; силу разрядного тока  $I$ , А и магнитную индукцию в рабочем зазоре  $B$ , Тл.

Условия опытов представлены в табл. 1, но при этом постоянными факторами были: зернистость порошка -  $A = 240/320$ ; СОЖ - 50 % раствор эмульсола Э2 в воде; шарик накатника 0 12,7 мм из стали ШХ15. Покрытия наносили на образцы из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, шириной 12 мм, подвергнутых нормализации.

Таблица 1

Условия опытов по матрице ЦКРУП

Уровни факторов	Значения технологических факторов				
	$P, H$	$S, \text{мм/об}$	$I, \text{А}$	$V, \text{м/с}$	$B, \text{Тл}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
0	1000	0,30	100	0,08	0,8
+ 1	1250	0,42	120	0,091	1,0
- 1	750	0,18	80	0,069	0,6
+ 2	1500	0,54	140	0,102	1,2
- 2	500	0,06	60	0,058	0,4

Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

В результате расчетов установлено, что в уравнениях регрессии, определяющих зависимости  $\varepsilon$ ,  $Ra$ ,  $G$  от технологических факторов  $P$ ,  $S$ ,  $I$ ,  $V$  и  $B$  при нанесении порошка Р6М5Ф3, коэффициенты значимы по критерию Стьюдента с 95 %-ной доверительной вероятностью, а сами уравнения адекватны по критерию Фишера при 5 %-ном уровне значимости:

$$Y_1 = \varepsilon = 2,05 + 0,39X_1 - 0,18X_2 + 0,48X_3 + 0,12X_4 + 0,19X_5 - 0,57X_1X_2 + 0,15X_1X_3 - 0,18X_1X_4 + 0,11X_1X_5 - 0,13X_2X_3 + 0,41X_2X_4 + 0,17X_2X_5 + 0,09X_3X_4 - 0,21X_3X_5 + 0,06X_4X_5 - 0,12X_1^2 - 0,16X_2^2 - 0,11X_3^2 - X_4^2 - X_5^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = Ra = 5,22 - 0,32X_1 + 0,51X_2 - 0,41X_3 - 0,32X_4 + 0,31X_5 - 0,38X_1X_2 + 0,43X_1X_3 - 0,11X_1X_4 + 0,35X_1X_5 - 0,53X_2X_3 + 0,84X_2X_4 + 0,23X_2X_5 - 0,87X_3X_4 - 0,39X_3X_5 - 0,12X_4X_5 + 0,51X_1^2 + 0,11X_2^2 + 0,27X_3^2 + 0,09X_4^2 + 0,25X_5^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = G = 0,184 + 0,012X_1 - 0,082X_2 - 0,016X_3 - 0,021X_4 + 0,028X_5 - 0,013X_1X_2 + 0,008X_1X_3 - 0,012X_1X_4 + 0,023X_1X_5 + 0,017X_2X_3 - 0,014X_2X_4 + 0,08X_2X_5 - 0,018X_3X_4 + 0,017X_3X_5 + 0,008X_4X_5 - 0,010X_1^2 - 0,019X_2^2 - 0,020X_3^2 - 0,03X_4^2 - 0,016X_5^2. \quad (3)$$

Для полученных уравнений (1) - (3) из общей модели для параметров процесса составлялись уравнения регрессии для каждого из технологических факторов, оставшиеся факторы фиксировались на нулевом уровне (рисунок).

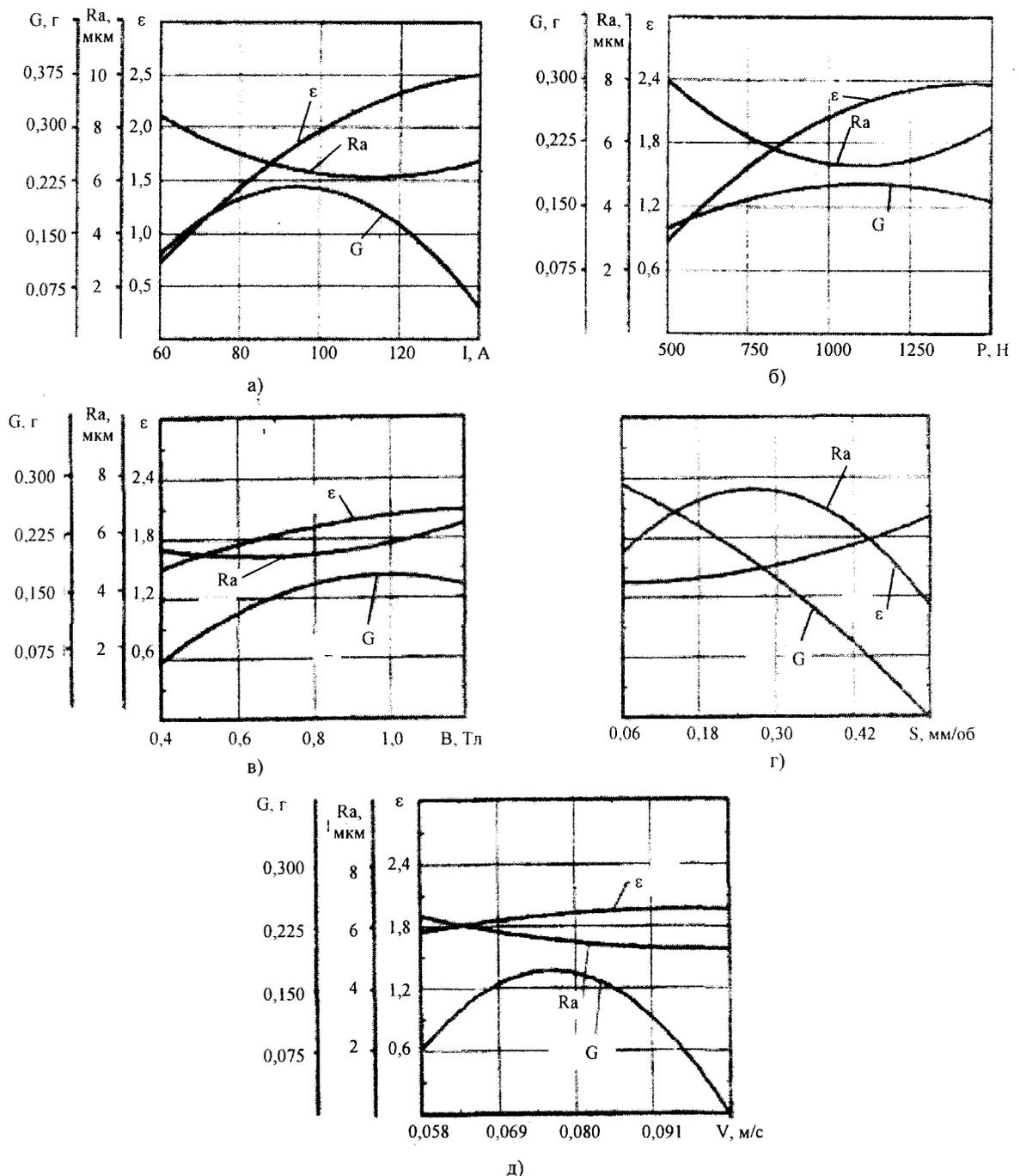


Рис. 1. Зависимости параметров электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием порошка Р6М5Ф3 от технологических факторов: а - силы тока  $I$ ; б - усилия деформирования  $P$ ; в - магнитной индукции  $B$ ; г - продольной подачи  $S$ ; д - окружной скорости  $V$

Анализ рис. 1 показывает, что зависимости параметров от технологических факторов носит экстремальный характер, обусловленный совместным действием потоков электрической и магнитной, тепловой и механической энергии. Полученные уравнения (1) - (3) позволили выявить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации (табл. 2).

С учетом уровня значимости исследуемые факторы можно расположить в ряды в порядке убывания влияния на оптимизируемые параметры:

$$\varepsilon: I \rightarrow P \rightarrow B \rightarrow S \rightarrow V;$$

$$Ra: S \rightarrow I \rightarrow P = V \rightarrow B;$$

$$G: S \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow I \rightarrow P.$$

Таблица 2

Влияние технологических факторов на параметры электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием

Технологические факторы	Степень влияния факторов, %		
	$Y_1 = \varepsilon$	$Y_2 = Ra$	$Y_3 = G$
Усилие деформирования, $P$	28,7	17,1	7,5
Скорость подачи, $S$	13,2	27,3	51,6
Сила разрядного тока, $I$	35,3	21,9	10,1
Окружная скорость заготовки, $V$	3,3	17,1	13,2
Магнитная индукция в рабочем зазоре, $B$	14	16,6	17,6

Из анализа данных табл. 2 и рис. 1 видно, что на износостойкость  $s$  наибольшее влияние оказывает сила разрядного тока. Далее в порядке убывания по значимости следуют усилие деформирования  $P$  и магнитная индукция  $B$ . Заканчивают этот ряд скорость подачи  $S$  и окружная скорость детали  $V$ .

Очевидно, что значение  $I$ , задавая количество теплоты, подводимое в зону наплавки, определяет фазовые и структурные превращения в покрытии и основе, а также глубину диффузии элементов порошка в материал основы. С ростом усилия  $P$  увеличивается глубина и степень деформации и, следовательно, износостойкость покрытия. Значение магнитной индукции  $B$  в рабочей зоне влияет на жесткость цепочек-электродов и совместно с  $I$  определяет время существования электрического разряда. Влияние скоростей  $S$  и  $V$  на ее невелико.

Наибольшее влияние на шероховатость поверхности  $Ra$  оказывает продольная подача  $S$ , далее следует сила разрядного тока  $I$  и усилие деформирования  $P$ , а завершает ряд магнитная индукция  $B$ . Это происходит потому, что помимо рассмотренных выше тепловых и деформационных процессов при формировании рельефа поверхности особую роль играют формообразующие движения  $S$  и  $V$ , связанные также с поглощением тепла деталью и перекрытием контактных площадок при деформировании поверхности.

На производительность процесса  $Q$  наибольшее влияние оказывают скорость подачи  $S$ , магнитная индукция и окружная скорость. Далее по значимости следует сила разрядного тока  $I$ , а замыкает этот ряд силовая характеристика  $P$ , которая незначительно влияет на процесс наплавки (рис. 2, б).

Для определения оптимального режима ЭМН с ППД порошка Р6М5Ф3 решали задачу как для отдельных (табл. 3), так и для комплекса параметров оптимизации ( $Y_1 = \varepsilon$ ,  $Y_2 = Ra$ ,  $Y_3 = G$ ) по обобщенной функции желательности Харрингтона [3, 4].

Функция желательности определяется уравнением:

$$d = \exp[-\exp(-y')],$$

где  $y'$  – безразмерное значение параметра оптимизации.

Таблица 3

Оптимизация технологических факторов электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием для исследуемых параметров

Параметр оптимизации	Оптимальные значения факторов				
	$I$ , А	$P$ , Н	$B$ , Тл	$S$ , мм/об	$V$ , м/с
$Y_1 = \varepsilon$	120	1150	0,94	0,27	0,084
$Y_2 = Ra$	110	1160	0,84	0,22	0,090
$Y_3 = G$	104	1200	1,10	0,22	0,078

Обобщенная функция желательности формируется как среднее геометрическое желательностей отдельных параметров оптимизации для комплекса из  $n = 3$  параметров:

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_n}.$$

На основании комплексной оптимизации можно рекомендовать режим электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием порошка Р6М5Ф3 для получения износостойких покрытий, имеющих наименьшую шероховатость поверхности и наибольшую производительность:  $P = 1350$  Н;  $S = 0,2$  мм/об;  $I = 110$  А;  $V = 0,085$  м/с;  $B = 1$  Тл.

Исследования и оптимизация ЭМН с ППД показали, что величина разрядного тока оказывает наибольшее влияние на износостойкость покрытия (рис. 1, а). При значении  $I < 60$  А покрытие формируется недостаточной толщины и качества. С увеличением силы разрядного тока повышается мощность разряда, что приводит к росту толщины покрытия (производительности) и увеличению износостойкости, шероховатость при этом уменьшается. Однако, при  $I > 140$  А наблюдается перегрев поверхности вплоть до оплавления отдельных участков. Анализ зависимостей (см. рис. 1, а) показывает, что наиболее интенсивно и с высоким качеством покрытия процесс наплавки происходит при выполнении условия  $100 < I < 125$  А.

Важным фактором, заметно расширяющим технологические возможности ЭМН с ППД, является усилие деформирования  $P$  (см. рис. 1, б). При увеличении его до 1000 Н происходит уменьшение шероховатости поверхности, повышение износостойкости и производительности. Дальнейшее увеличение усилия незначительно изменяет названные параметры. Однако при  $P > 1400$  Н наблюдается увеличение шероховатости. В поверхностном слое покрытия возникают большие напряжения, при которых возможно появление трещин. Анализ зависимостей (см. рис. 1, б) дает основание считать, что наилучшее качество покрытия получается при усилии деформирования  $1100 < P < 1350$  Н.

Значение магнитной индукции  $B$  (рис. 2, в) влияет как на качество покрытия так и на его толщину. При  $B < 0,4$  Тл порошок слабо удерживается в рабочей зоне, и покрытие из-за плохой сплошности низкого качества. С повышением магнитной индукции толщина покрытия увеличивается. Но при магнитной индукции более 1,2 Тл начинает уменьшаться толщина покрытия, повышается шероховатость поверхности, появляются несплошности. Объясняется это тем, что при  $B > 1,2$  Тл происходит повышение жесткости цепочек-электродов. Это приводит к нестабильному возникновению электрических разрядов из-за неустойчивости размеров разрядных промежутков в цепочке. Анализ показывает, что в рабочем зазоре наиболее благоприятной является магнитная индукция, равная 0,8... 1,1 Тл.

При выборе подачи и окружной скорости детали следует учитывать, что чем больше величина подачи и скорости, тем больше производительность процесса. Однако если изменение подачи в пределах от 0,06 до 0,25 мм/об оказывает незначительное влияние на технологические и эксплуатационные показатели оптимизации, то увеличение подачи более 0,35 мм/об вызывает заметное уменьшение производительности, износостойкости и увеличение шероховатости поверхности (рис. 1, г). Из данных (рис. 1, д) видно, что из всех исследуемых технологических факторов скорость обработки оказывает наименьшее влияние на износостойкость покрытия. Она же незначительно влияет на шероховатость поверхности. Анализируя зависимости (рис. 1, г и рис. 1, д), можно заключить, что оптимальными являются подача  $0,2 < S < 0,3$  мм/об и скорость  $0,08 < V < 0,09$  м/с.

Таким образом, результаты исследований многопараметрической оптимизации технологических факторов электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием показали, что отличия оптимальных режимов для относительной износостойкости от режимов для комплекса технологических факторов невелики, а для оптимизации по износостойкости, требующей больших затрат на проведение длительных испытаний на машине трения, целесообразно использовать параметры производительности и качества обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, А.П. Ракомсин и др. - Мн.: ФТИ НАН Беларуси, 1997. - 416 с.
2. Кожуро Л.М., Чемисов Б. П. Обработка деталей машин в магнитном поле. - Мн.: Навука і тэхніка, 1995.-232 с.
3. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. - Мн.: Вышэйшая школа, 1985. - 236 с.
4. Кожуро Л.М., Романова Т.К., Дымар О.В. Методика оптимизации технологии электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием / Весці АН Беларусі Сер. фіз.-тэхн. навук.- 1995.-№3.-С. 43-45.
5. Романова Т.К. Управление структурой и свойствами покрытий из порошков быстрорежущих сталей при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники электромагнитной наплавкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Мн.: БАТУ, 1999. - 18 с.