

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 621.791.92:621.81
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

Поступила в редакцию 06.04.2020
Received 06.04.2020

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

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

Аннотация. С целью определения оптимальных значений технологических факторов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) выполнено экспериментальное исследование процесса нанесения покрытия из ферромагнитного порошка Fe – 2 % V на детали из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71). В качестве параметров оптимизации МЭУ приняты производительность процесса и сплошность покрытия. Методом планирования экспериментов на основе 5-факторного центрального композиционного ротatable-плана получены стохастические модели в виде регрессионных уравнений второго порядка. Установлено, что технологическим фактором, наиболее влияющим на оба параметра, является величина магнитной индукции в рабочем зазоре. С ее возрастанием производительность процесса и сплошность покрытия увеличиваются нелинейно до предельного максимального значения, что объяснено механизмом формирования в рабочем зазоре токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью и различным направлением относительно магнитных силовых линий. Для определения оптимального режима МЭУ решены задачи поиска максимумов наибольшей производительности и сплошности покрытия в границах исследованного факторного пространства. Найденные оптимальные по каждому отдельному параметру режимы МЭУ совпадают только по величине магнитной индукции и плотности разрядного тока. Оптимальные значения остальных управляющих факторов лежат в разных областях факторного пространства для разных параметров оптимизации. Для поиска компромиссных по обоим критериям режимов МЭУ решена задача многокритериальной оптимизации. Полученное решение указывает, что наибольшее влияние на производительность процесса и сплошность покрытия в области компромиссных режимов оказывает плотность разрядного тока. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении плотности разрядного тока и окружной скорости обрабатываемой детали, что способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность. Определены предпочтительные технологические режимы процесса МЭУ по обобщенному критерию оптимальности.

Ключевые слова: магнитная индукция, плотность разрядного тока, рабочий зазор, ферромагнитный порошок, математическое моделирование, сплошность покрытия

Для цитирования: Акулович, Л. М. Оптимизация технологических факторов магнитно-электрического упрочнения / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, М. М. Дечко // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 404–412. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

Leonid M. Akulovich, Alexey V. Miranovich, Mikhail M. Dechko

Belarus State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL FACTORS OF MAGNETIC-ELECTRIC STRENGTHENING

Abstract. In order to determine the optimal values of technological factors for electromagnetic hardening process (EMHP), an experimental study of the process of applying ferromagnetic Fe – 2 % V powder coating on 30XHG (GOST 4543-71) steel parts was conducted. The process productivity and coating continuity were selected as the target parameters for the EMHP optimization. By applying the experimental design method, based on 5-factor central composite rotatable uniform plan, we have created stochastic models, expressed in regression functions of the second order. It has been determined that the magnetic induction value in the working gap is the most significant technological factor, affecting both target parameters. With the increasing induction magnitude the process productivity and the coating continuity increase non-linearly until the

maximum limit value, which was attributed to the forming of current-conductive chains in the working gap, that have varying electrical conductivity and different directions relative to the lines of magnetic field forces. In order to determine the optimal EMHP mode we have solved the problems of finding maximums for greatest productivity and coating continuity within the constraints of the studied factor range. The discovered EMHP-modes, optimal for each separate parameter, coincide only in the value of the magnetic induction and the discharge density. The optimal values for the other control factors belong to different areas of factor range for different optimization parameters. To determine the EMHP modes, balanced against the both parameters, the problem of multicriteria optimization was solved. The obtained solution reveals that the density of discharge currents produces the biggest impact on the process productivity and the coating continuity within the balanced modes. At the same time the high continuity of the coating is achieved by the supplementing increase of peripheral speed of the processed workpiece, which leads to even distribution of the intensively supplied mass of the ferromagnetic powder on the treated surface. The recommended technological modes of EMHP have been determined, based on the generalized optimality criteria.

Keywords: magnetic induction, discharge density, working gap, ferromagnetic powder, mathematical modelling, coating continuity

For citation: Akulovich L. M., Miranovich A. V., Dechko M. M. Optimization of technological factors of magnetic-electric strengthening. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 404–412 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

Введение. Известно, что от свойств и состояния поверхностного слоя деталей, который наиболее подвержен внешним воздействиям, зависит надежность и ресурс работы машин и механизмов. Решающее влияние на формирование геометрических и физико-механических свойств поверхностей деталей оказывает технология их обработки [1–4]. Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление множества способов упрочнения изнашиваемых поверхностей, каждый из которых имеет свою рациональную область применения и не может претендовать на универсальность. Большими потенциальными возможностями обладают методы обработки металлов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, что практически исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Анализ таких методов по обобщенным параметрам показывает, что технологии магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) имеют ряд существенных достоинств [4–6]: не требуется специальной подготовки поверхности перед упрочнением, простота реализации электрических и магнитных потоков энергии, удобство автоматизированного управления. Вместе с тем для процесса МЭУ свойственна неравномерность распределения по упрочняемой поверхности вкраплений материала ферромагнитного порошка при воздействии на него электрических разрядов, что в зависимости от времени обработки приводит либо к снижению сплошности наносимого покрытия, либо к неэффективному использованию упрочняющего порошка.

Ранее проведенные исследования [4, 6, 7] по совершенствованию процесса МЭУ были направлены на интенсификацию нанесения покрытий путем генерирования электромагнитных полей, изменяющих величину силы прижима зерен ферромагнитного порошка к упрочняемой поверхности. Однако физическая связь производительности магнитно-электрического упрочнения и сплошности наносимого покрытия в настоящее время не установлена, поскольку равномерность распределения по поверхности зерен ферромагнитного порошка является следствием самоорганизации процесса при синергизме электромагнитных и кинематических факторов.

Целью настоящего исследования является определение значений технологических параметров МЭУ, обеспечивающих достижение высоких показателей качества поверхностей деталей наиболее производительным путем.

Методика исследований. При решении подобных задач, как правило, показатели качества и производительности являются конфликтующими параметрами, оптимальные значения которых достижимы при различных значениях управляющих факторов. Поэтому оптимизация технологического процесса требует поиска варианта, компромиссного по обоим критериям. Эффективной методологией решения этой проблемы является математическое моделирование, основанное на получении многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальная оптимизация с помощью построенной математической модели.

В качестве параметров оптимизации МЭУ приняты производительность процесса (Q , мг/мин) и сплошность покрытия (СП, %). Производительность магнитно-электрического упрочнения оценивалась по массе покрытия, нанесенного на упрочняемую поверхность, в единицу времени. Масса образцов измерялась до и после упрочнения на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Для определения сплошности покрытия на участках длиной 10 мм проводили

измерения длины поверхности с покрытием в продольном и поперечном направлениях на большом инструментальном микроскопе (БИМ-1Ц). Сплошность покрытия рассчитывали как отношение суммы длин с покрытием ко всей длине участка. Значение показателей для данных условий МЭУ определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Ввиду высокой сложности описания физических процессов осаждения расплавляемых ферромагнитных частиц порошка в магнитном поле на поверхность металла и большого числа факторов, влияющих на эти процессы, исследование технологии магнитно-электрического упрочнения выполнено на основе стохастического подхода.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71), представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Масса исходных образцов – 125 г. Образцы подвергались нормализации и обрабатывались до шероховатости поверхности $Ra = 12,5$ мкм. Упрочнение поверхностей образцов с использованием ферромагнитного порошка Fe – 2 % V проводилось на экспериментальной установке модели УНП-1, смонтированной на токарно-винторезном станке модели 1Е61М.

На постоянных уровнях поддерживались следующие технологические факторы: размер частиц композиционного порошка $\Delta = 240\text{--}320$ мкм; величина рабочего зазора $\delta = 1,0$ мм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5%-ный раствор эмульсола Э2 в воде) $q = 0,4 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с · мм²).

Исходя из априорной информации, в качестве независимых управляющих факторов приняты технологические факторы, которые оказывают наибольшее влияние на показатели формирования упрочненного слоя (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Перечень управляющих технологических факторов и средств их измерения

Table 1. The list of controlling technological factors and means for their measurement

Технологический фактор	Метод регулирования	Средство измерения	Точность фиксирования
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре, B , Тл	Величиной тока в катушках электромагнитов	Измеритель магнитной индукции ИМИ-1	$\pm 1,5$ %
Плотность разрядного тока, i , А/мм ²	Изменение параметров электрических импульсов инверторного сварочного источника	Источник технологического тока Invertec V270 T	± 2 %
Удельная длительность упрочнения, τ , с/см ²	Продольной подачей полюсного наконечника электромагнита относительно упрочняемой поверхности	Секундомер	$\pm 0,05$ с/см ²
Окружная скорость заготовки детали, V , м/с	Настройкой токарно-винторезного станка мод. 1Е61М	Механический тахометр MVR RY-850	$\pm 0,02$ %
Подача ферромагнитного порошка, q , г/с	Изменением величины напряжения электродвигателя вибратора	Весы аналитические ВЛА-200-2М	± 1 мг/с

Величину тока в катушках электромагнитов I_k , обеспечивающего заданное значение магнитной индукции B , определяли из зависимости $B = f(I_k)$, построенной по экспериментальным данным.

На основе анализа существующих вариантов и методов математического моделирования технологических процессов [8–11] установлено, что процесс МЭУ можно адекватно описать регрессионными уравнениями второго порядка. Для

Т а б л и ц а 2. Интервалы варьирования технологических факторов

Table 2. Intervals of process factors variation

Уровень факторов	Технологические факторы				
	B , Тл	i , А/мм ²	τ , с/см ²	V , м/с	q , г/с
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Основной (0)	0,60	1,80	2,50	0,06	0,17
Верхний (+1)	0,75	2,20	3,00	0,08	0,20
Нижний (–1)	0,45	1,40	2,00	0,04	0,14
Звездная точка (+ α)	0,90	2,60	3,50	0,10	0,23
Звездная точка (– α)	0,30	1,00	1,50	0,02	0,11

получения необходимых данных были реализованы опыты по матрице центрального композиционного ротатбельного равномерного плана экспериментов. Интервалы варьирования управляющих технологических факторов приведены в табл. 2. Результаты опытов и рассчитанные значения статистических критериев представлены в табл. 3.

Обработка результатов экспериментов выполнена по алгоритму шагового регрессионного анализа с последовательным исключением из уравнения регрессии коэффициен-

тов, статистически незначимых по критерию Стьюдента. Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования получены уравнения в нормированных координатах, определяющие зависимости Q и СП от управляющих технологических факторов:

$$Q = 224,61 + 6,43X_1 + 1,96X_2 - 1,89X_3 + 0,33X_4 + 1,76X_5 + 1,66X_1X_2 - 1,21X_1X_3 + 1,59X_1X_4 - 1,94X_1X_5 - 2,26X_2X_3 - 2,34X_2X_5 + 2,24X_3X_5 + 0,19X_4X_5 - 4,18X_1^2 - 0,78X_2^2 - 1,73X_3^2 - 0,26X_4^2 - 0,23X_5^2; \tag{1}$$

$$СП = 95,49 + 6,47X_1 + 2,58X_2 + 5,30X_3 + 3,25X_4 + 2,42X_5 + 0,95X_1X_2 - 1,40X_1X_3 + 2,80X_3X_4 - 0,98X_1X_5 - 0,70X_2X_3 - 0,53X_2X_5 + 0,73X_3X_5 - 2,53X_4X_5 - 2,11X_1^2 - 0,24X_2^2 - 1,66X_3^2 - 4,14X_4^2 - 1,61X_5^2. \tag{2}$$

Установлено, что регрессионные модели адекватны при 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера (см. табл. 3).

Полученные математические стохастические модели процесса МЭУ позволяют установить характер и степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальные режимы нанесения упрочняющих покрытий.

Анализ коэффициентов регрессии показывает, что технологическим фактором, наиболее влияющим на оба параметра, является величина магнитной индукции в рабочем зазоре. С ее увеличением наиболее интенсивно возрастает и производительность процесса, и сплошность покрытия. Однако знак «минус» при квадрате этого фактора указывает, что с увеличением магнитной индукции в рабочем зазоре масса наносимого ферромагнитного порошка увеличивается до определенного значения. Такой характер зависимостей (1) и (2) можно объяснить тем, что величина магнитной индукции влияет не только на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов из зерен упрочняющего ферромагнитного порошка, но и на электрическую проводимость этих токопроводящих цепочек.

При прохождении электрического тока по образовавшимся цепочкам последние можно рассматривать как проводники с током, находящиеся во внешнем магнитном поле. На элемент цепочки длиной Δl в рабочем зазоре действует сила

$$\Delta F = I B \Delta l,$$

где I – величина тока в цепочке, A ; B – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл.

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента, результаты опытов и их статистические оценки

Table 3. Experimental design matrix, results of experiments and their statistical estimates

$B, \text{Тл}$	$i, \text{А/мм}^2$	$\tau, \text{с/см}^2$	$V, \text{м/с}$	$q, \text{г/с}$	Дубли	$Q \text{ мг/мин}$		СП, %	
						экспериментальное среднее	расчетное	экспериментальное среднее	расчетное
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5					
-1	-1	-1	-1	1	5	213,8	214,0	68,4	67,9
1	-1	-1	-1	-1	5	219,2	219,4	72,6	72,3
-1	1	-1	-1	-1	5	216,6	216,6	66,6	66,1
1	1	-1	-1	1	5	226,0	226,0	91,4	91,1
-1	-1	1	-1	-1	5	205,4	205,5	79,4	79,4
1	-1	1	-1	1	5	221,6	221,7	99,8	100,0
-1	1	1	-1	1	5	213,2	213,0	90,6	90,6
1	1	1	-1	-1	5	220,8	220,7	92,2	92,4
-1	-1	-1	1	-1	5	204,0	203,9	78,4	77,6
1	-1	-1	1	1	5	223,2	223,1	91,4	90,8
-1	1	-1	1	1	5	212,2	212,3	78,8	78,6
1	1	-1	1	-1	5	239,2	239,3	99,0	99,0
-1	-1	1	1	1	5	219,6	219,5	86,0	85,6
1	-1	1	1	-1	5	216,8	216,7	91,8	91,6
-1	1	1	1	-1	5	203,2	203,3	88,0	88,2
1	1	1	1	1	5	223,8	223,9	100	100,4
-2	0	0	0	0	5	195,0	195,0	73,4	74,1
2	0	0	0	0	5	220,8	220,7	100	100,0
0	-2	0	0	0	5	217,6	217,6	88,4	89,4
0	2	0	0	0	5	225,4	225,4	100	99,7
0	0	-2	0	0	5	221,6	221,5	77,0	78,2
0	0	2	0	0	5	213,8	213,9	100	99,4
0	0	0	-2	0	5	223,0	222,9	72,2	72,4
0	0	0	2	0	5	224,2	224,2	85,0	85,4
0	0	0	0	-2	5	220,2	220,2	83,8	84,2
0	0	0	0	2	5	227,2	227,2	93,6	93,9
0	0	0	0	0	30	224,6	224,6	95,6	95,5
Дисперсия воспроизводимости						0,316		1,98	
Дисперсия адекватности						0,180		3,84	
Критерий Фишера	экспериментальный					1,75		1,94	
	критический					2,96		2,01	

цепочек-микроэлектродов из зерен упрочняющего ферромагнитного порошка, но и на электрическую проводимость этих токопроводящих цепочек.

Если цепочка располагается строго вдоль магнитных силовых линий, то сила ΔF равна нулю. Однако в реальном процессе в рабочем зазоре одновременно формируется множество токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью, и некоторые из них могут иметь направление, не параллельное магнитным силовым линиям. В таком случае на зерна ферромагнитного порошка действуют силы ΔF и силы взаимодействия токов в цепочках, которые с увеличением магнитной индукции способны разорвать цепочку до момента расплавления зерен. Этим можно объяснить наличие экстремума в зависимостях (1) и (2).

Влияние остальных факторов зависит от их сочетания ввиду значительного взаимовлияния, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии. Поэтому для определения наиболее предпочтительного режима МЭУ решены задачи поиска максимумов наибольшей производительности и сплошности покрытия в границах исследованного факторного пространства (табл. 4). Соответствующие математические модели имеют вид:

$$Q(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \quad \text{и} \quad \text{СП}(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \\ -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2 \quad -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2 \quad (3)$$

Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad с использованием библиотеки программного обеспечения оптимизации KNITRO 7.0 и мультистарта из 100 случайных точек факторного пространства с целью поиска всех возможных локальных экстремумов.

Найденные оптимальные по каждому отдельному параметру режимы МЭУ совпадают только по величине магнитной индукции и плотности разрядного тока. По другим управляющим факторам оптимальные значения лежат в разных областях факторного пространства, что наглядно отображается сечениями поверхностей отклика, представленными на рис. 1. При этом в области оптимальных по критерию производительности режимов достигается 100%-ная сплошность покрытия (рис. 1, *a, b*), а по критерию максимальной сплошности эти области расположены в противоположных сторонах исследованного факторного пространства (рис. 1, *c, d*). Прогнозируемые значения сплошности, превышающие 100 %, указывают на то, что при этих режимах в отдельных областях будет наноситься покрытие увеличенной толщины. Кроме того, режимы, оптимальные по критерию максимальной производительности, лежат на границах интервалов варьирования управляющих факторов, где по матрице плана эксперимента наблюдения отсутствовали, что может вызывать значительную погрешность прогнозирования вследствие экстраполяции в неисследованную область.

Т а б л и ц а 4. Значения технологических факторов процесса МЭУ, оптимальные по различным критериям

Table 4. Values of technological factors of EMH process optimized on different criteria

Технологический фактор в нормированных и натуральных координатах		Параметры оптимизации		
		$Q \rightarrow \max$	СП $\rightarrow \max$	$Q \rightarrow \max$, СП = 100 %
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре	X_1	2,000		2,000
	B , Тл	0,9		0,9
Плотность разрядного тока	X_2	2,000		1,961
	i , А/мм ²	2,60		2,58
Удельная длительность упрочнения	X_3	-2,000	1,105	-2,000
	τ , с/см ²	1,5	3,05	1,5
Окружная скорость заготовки	X_4	2,000	-0,488	2,000
	V , м/с	0,10	0,05	0,10
Подача ферромагнитного порошка	X_5	-2,000	1,660	-2,000
	q , г/с	0,11	0,22	0,11
Производительность процесса	Q , мг/мин	265,8±1,7	206,6±1,1	265,3±1,7
Сплошность покрытия	СП, %	100,2±4,2	110,6±2,7	100±4,1

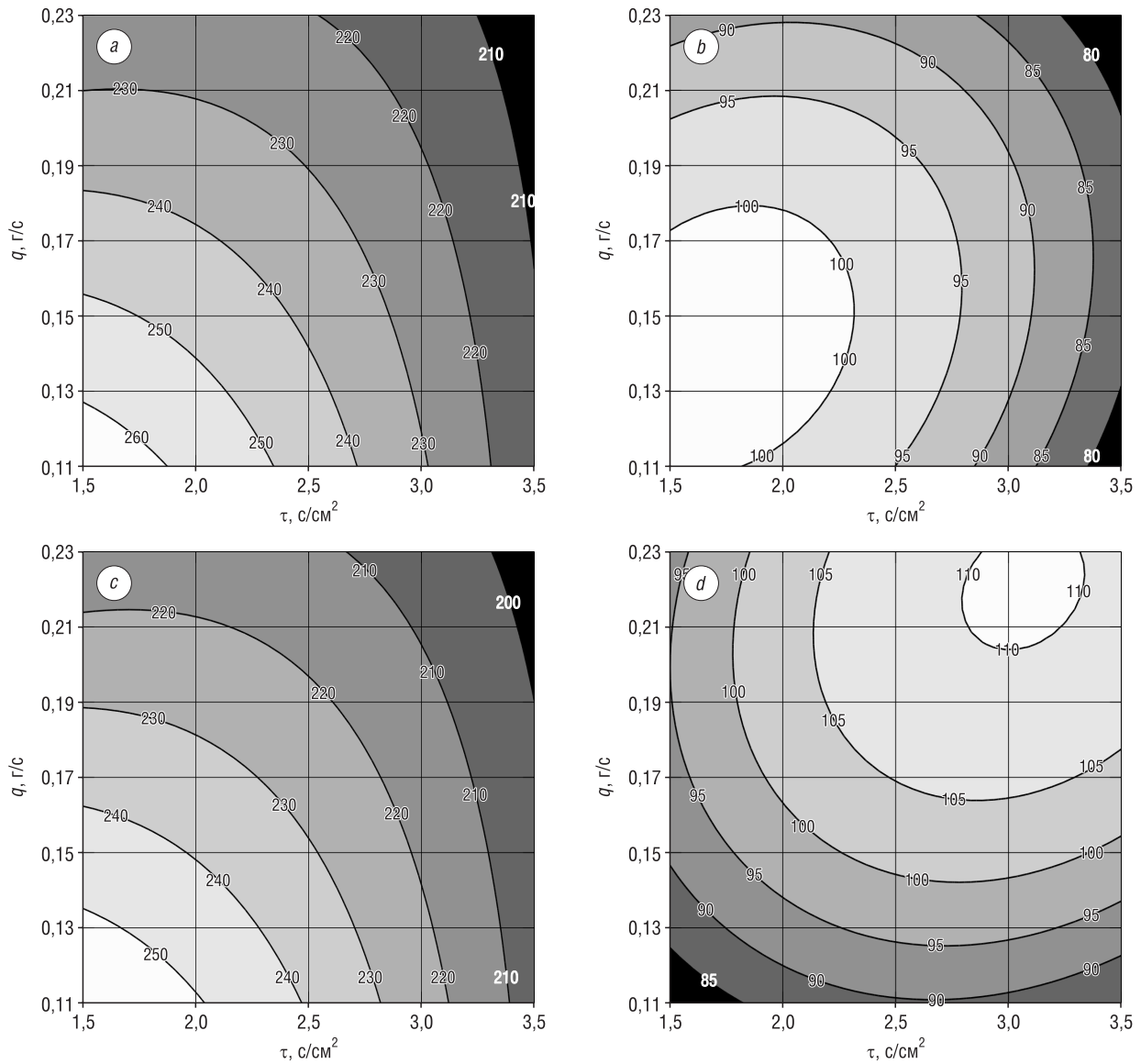


Рис. 1. Линии равных уровней производительности процесса Q , мг/мин (*a*, *c*), и сплошности покрытия СП, % (*b*, *d*), МЭУ в зависимости от удельной длительности упрочнения τ , с/см², и подачи ферромагнитного порошка q , г/с при оптимальных режимах по критериям максимальной производительности (*a*, *b*) или максимальной сплошности покрытия (*c*, *d*)

Fig. 1. Contour plot of process productivity Q , mg/min (*a*, *c*), and coating continuity CC, % (*b*, *d*), depending on specific duration of hardening τ , s/cm², and ferromagnetic powder supply q , g/s, when using optimal modes for the criteria of maximized productivity (*a*, *b*) or maximized continuity of coating (*c*, *d*)

Для поиска компромиссного по обоим критериям решения были рассчитаны режимы МЭУ по следующей математической модели (см. табл. 4):

$$\begin{aligned}
 & Q(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max, \\
 & \text{СП}(X_1, \dots, X_5) = 100 \%, \\
 & -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Полученное решение в геометрическом виде показано на рис. 2, из которого следует, что существенное влияние на производительность процесса и сплошность покрытия в области компромиссных режимов оказывает плотность разрядного тока. При увеличении плотности разрядного тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую и обеспечивается интенсивный нагрев и плавление зерен ферромагнитного порошка, расположенных

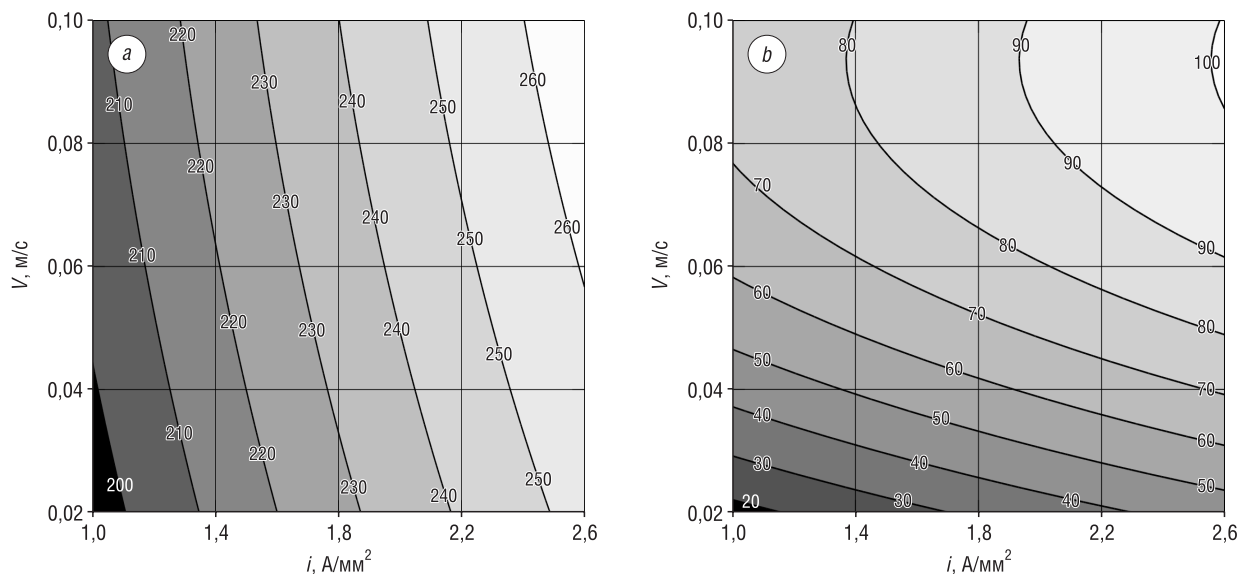


Рис. 2. Линии равных уровней производительности процесса Q , мг/мин (а), и сплошности покрытия СП, % (б), МЭУ в зависимости от плотности разрядного тока i , А/мм², и окружной скорости заготовки V , м/с, при оптимальных режимах по компромиссному критерию (4)

Fig. 2. Contour plot of process productivity Q , mg/min (a), and coating continuity CC, % (b), depending on the discharge density i , A/mm², and peripheral speed V , m/s, when using the optimal modes for the balanced criterion (4)

в цепочках-микроэлектродах. В результате возрастают производительность процесса нанесения упрочняющего покрытия. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении окружной скорости заготовки (см. рис. 2, б), которая способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность.

Заключение. В результате экспериментального исследования получены стохастические модели в виде 5-факторных регрессионных уравнений второго порядка, адекватно описывающие зависимости производительности процесса упрочнения и сплошности формируемых покрытий из ферромагнитного порошка Fe – 2 % V на поверхностях образцов из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71) от технологических факторов МЭУ.

Полученные модели показывают, что влияние технологических факторов на параметры оптимизации нелинейно и не однозначно, так как зависит от их сочетания, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии.

Выявлено, что наибольшее влияние на производительность процесса МЭУ и сплошность формируемого покрытия оказывает величина магнитной индукции в рабочем зазоре. Анализ полученных зависимостей с экстремумами показывает, что с увеличением магнитной индукции наиболее интенсивно возрастает сплошность покрытия и повышается до определенного значения производительность процесса упрочнения. Такой характер изменения исследуемых параметров объясняется одновременным формированием множества токопроводящих цепочек-микроэлектродов с различной электрической проводимостью, некоторые из которых имеют направление, не параллельное магнитным силовым линиям в рабочем зазоре. При этом происходит разрыв цепочек-микроэлектродов до момента начала расплавления зерен ферромагнитного порошка в результате одновременного разнонаправленного действия сил магнитного поля на них, а также взаимодействия токов в цепочках и увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре.

Выявлено, что при увеличении плотности разрядного тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую, обеспечиваются стабильные нагрев и плавление устойчиво расположенных цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. В результате возрастает производительность процесса упрочнения и износостойкость покрытий. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении окружной скорости заготовки, которая

способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на упрочняемую поверхность.

Определены оптимальные технологические режимы процесса магнитно-электрического упрочнения по различным критериям оптимальности.

Список использованных источников

1. Соколов, И. О. Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. – Барановичи: РИО БарГУ, 2012. – 183 с.
2. Перемитько, В. В. Оптимизация режимов дуговой наплавки под флюсом по слою легирующей шихты деталей ходовой части гусеничных машин / В. В. Перемитько, Д. Г. Носов // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5–6. – С. 49–52.
3. Водин, Д. В. Магнитно-импульсная обработка как перспективный метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента / Д. В. Водин // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). – СПб.: Свое издательство, 2015. – С. 67–70.
4. Акулович, Л. М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л. М. Акулович, А. В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2016. – 236 с.
5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 1997. – 416 с.
6. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000. – 201 с.
7. Федосенко А. С. Оптимизация условий получения механически легированных композиционных порошковых материалов для напыления износостойких плазменных покрытий / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3 (52). – С. 107–120.
8. Лавров, В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В. В. Лавров, Н. А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – 257 с.
9. Seber, G. A. F. Linear Regression Analysis / G. A. F. Seber, A. J. Lee. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. – 458 p.
10. Miller, S. H. Experimental design and statistics / S. H. Miller. – London: Routledge, 2015. – 186 p.
11. Производительность и качество наплавки при коаксиальной подаче лазерного излучения и газопорошковой смеси (струи) / К. Занга [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2015. – № 51 (4). – С. 34–41.

References

1. Sokorov I. O., Spiridonov N. V., Neroda M. V. *Technology of Strengthening of Heavy-Loaded Parts by Gas-Thermal Spraying*. Baranovich, Editorial Publishing Department of Baranovich State University, 2012. 183 p. (in Russian).
2. Peremitko V. V., Nosov D. G. Optimization of flux-core arc welding along the layer of alloying charge of caterpillar machine running gear parts. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2015, no. 5–6, pp. 49–52 (in Russian).
3. Vodin D. V. Magnetic pulse processing as an innovative method for increasing wear resistance of the metal cutting tool. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy: materialy III Mezhdunar. nauch. konf. (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2015 g.)* [Technical Sciences: Proceedings of the III International Scientific Conference (St. Petersburg, July 2015)]. St. Petersburg, 2015, pp. 67–70 (in Russian).
4. Akulovich L. M., Miranovich A. V. *Magnetic-Electric Strengthening of the Surfaces of Agricultural Machinery Parts*. Minsk, Belarus State Agrarian Technical University, 2016. 236 p. (in Russian).
5. Yashcheritsyn P. I., Kozhuro L. M., Rakomsin A. P., Sergeev L. E., Sidorenko M. I. *Process Fundamentals of Part Processing in Magnetic Field*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1997. 416 p. (in Russian).
6. Rakomsin A. P. *Strengthening and Restoration of Parts in Electromagnetic Field*. Minsk, Paradox Publ., 2000. 201 p. (in Russian).
7. Fedosenko A. S., Lovshenko G. F., Lovshenko F. G. Optimization of the production of mechanically alloyed composite powder materials for wear-resistant sprayed plasma coatings. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2016, no. 3(52), pp. 107–120 (in Russian).
8. Lavrov V. V., Spirin N. A. *Methods for Engineering Experiment Design and Evaluation*. Ekaterinburg, Ural State Technical University – UPI, 2004. 257 p. (in Russian).
9. Seber G. A. F., Lee A. J. *Linear Regression Analysis*. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2012. 458 p.
10. Miller S. H. *Experimental Design and Statistics*. London, Routledge, 2015. 186 p.
11. Zang K., Yao D., Kovalenko V. S., Anyakin N., I., Kondrashev P. V., Zhuk P. O., Stepura A. N. Efficiency and quality of build-up when using coaxial supply of laser radiation and gas-powder mixture (jets). *Elektronnaya obrabotka materialov = Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, no. 51 (4), pp. 34–41 (in Russian).

Информация об авторах

Акулович Леонид Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

Миранович Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, декан факультета технического сервиса в АПК, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dekanatfts@yandex.by

Дечко Михаил Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры моделирования и проектирования, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mdechko@rambler.ru

Information about the authors

Leonid M. Akulovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department Metal Technologies, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

Alexey V. Miranovich – Ph. D. (Engineering), Dean of the Farm Machinery Service Faculty, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dekanatfts@yandex.by

Mikhail M. Dechko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department Simulation and Design, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mdechko@rambler.ru