

Акулович Л.М.,
Миранович А.В.,
Ворошуха О.Н.

УО «Белорусский государственный
аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь,
E-mail: dekanatfts@yandex.ru,
miron23@tut.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 621.791.92 : 621.81

В статье рассматривается влияние характера магнитного поля на процесс магнитно-электрического упрочнения деталей машин. Установлены режимы магнитно-электрического упрочнения с целью получения наибольшей стабильности процесса.

Ключевые слова: магнитно-электрическое упрочнение, электромагнитное поле, электромагнитная система, постоянный магнит, стабильность процесса, композиционный ферромагнитный порошок.

Основная сущность процесса магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) состоит в образовании в рабочем зазоре δ (рис. 1, а) цепочек композиционного ферромагнитного порошка (ФМП). Влияние квазистационарного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитными катушками, на образовавшиеся цепочки достаточно описывается основными уравнениями Максвелла [1, 2]

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

где γ – удельная проводимость среды, См/м; \vec{H} – вектор напряженности внешнего магнитного поля, А/м; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м; \vec{B} – вектор индукции магнитного поля, Тл.

Так как внешнее магнитное поле в рабочем зазоре генерируется электромагнитом, то при расчетах можно пренебречь токами смещения $\partial \vec{D} / \partial t$ и использовать дифференциальный закон Ома для токов проводимости [2]. В систему уравнений переменного магнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции и полного тока [2, 3]:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad (3)$$

Выбрав направление силовых линий за ось X системы координат (рис. 1, в, г), для отличной от нуля компоненты магнитного поля B_{30x} из уравнения соленоидальности (3) получим $(\partial / \partial x) B_{30x} = 0$ и магнитная индукция может изменяться только поперек направления силовых линий. На основании этого рассмотрим воздействие нестационарного внешнего магнитного поля на цепочку ФМП (рис. 1, в), которая сориентирована вдоль силовой линии (по оси X). Примем следующие допущения: цепочку ФМП (рис. 1, г), состоящую из частиц ФМП с размерами малой (b_i) и большой (Δ_i) осей, будем рассматривать как однородный проводник, представляющий собой трубку тока в виде сплошного цилиндра 5 (рис. 1, в), у которого величины γ , ε_a и μ_a постоянные.

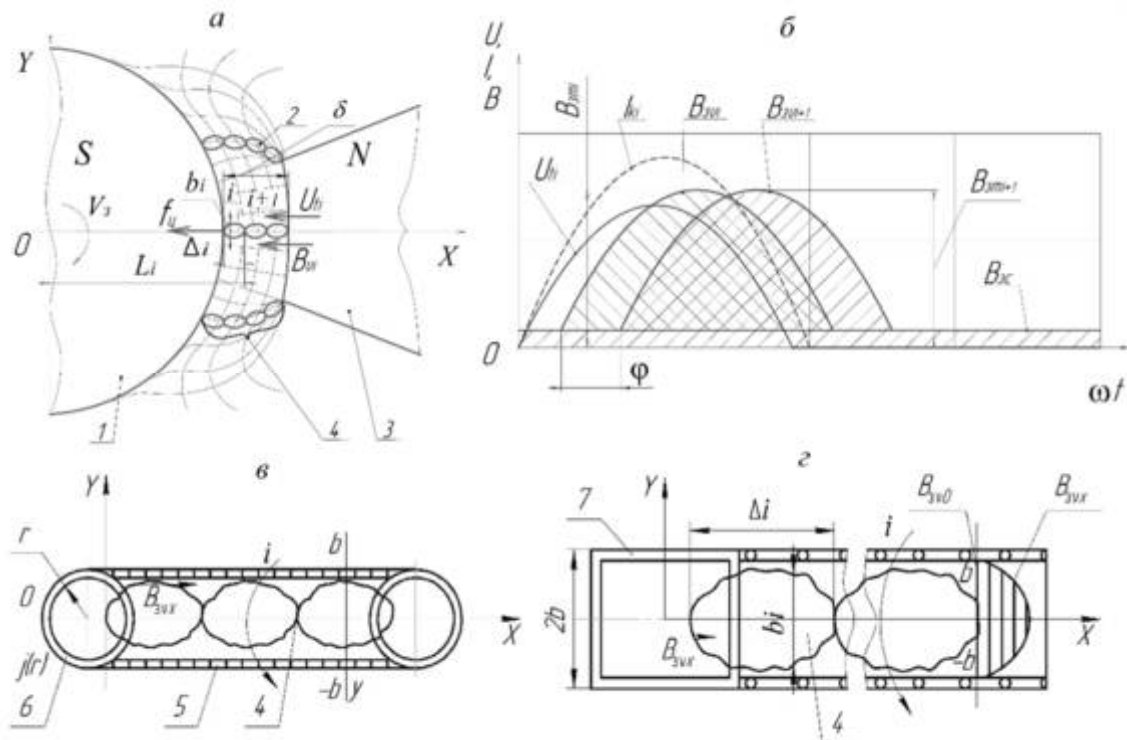


Рис. 1. Схема действия силы прижима f_n на цепочку ФМП и картина магнитного поля в рабочем зазоре устройств МЭУ (а), временная диаграмма тока электромагнита (I_{ki}) и напряжения источника питания технологического тока (U_n), индукций в рабочем зазоре (б), схема цепочки ФМП в рабочем зазоре при расчете индукции с проводником цилиндрической формы (в) и прямоугольной формы (з): 1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный наконечник; 4 – цепочка ФМП, 5 – проводник-цилиндр, 6 – соленоид, 7 – плоский соленоид

В результате преобразования системы (1) – (2) по аналогии с [2], исключая вектор напряженности \vec{E} , получим следующие уравнения:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{\gamma} \text{rot} \text{rot} \vec{H}, \quad \text{или} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma \mu_a} \text{rot} \text{rot} \vec{B}. \quad (4)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Аналогично [2], как и для вектора-потенциала \vec{A} , введем лапласиан векторного поля $\Delta \vec{B} = -\text{rot} \text{rot} \vec{B} + \text{grad} \text{div} \vec{B}$.

Приняв за основу, что замкнутый магнитный поток на входе и выходе в объем равен 0, преобразуем уравнения (4), ($\text{div} \vec{B} = 0$):

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \Delta \vec{B}. \quad (5)$$

Исключая из уравнения (5) вектор напряженности \vec{B} (плотность свободных зарядов в рассматриваемом проводнике $\rho = 0$) и проведя такие же преобразования, получаем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \epsilon_a} \Delta \vec{E}. \quad (6)$$

где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Уравнения (5), (6) приведены для мгновенных значений векторов электромагнитного поля и являются уравнениями диффузии [2, 4]. В данном случае примем допущение:

исследуемый объект рассматривается как соленоид 6, обеспечивающий воздействие однородного магнитного поля на сплошной проводник (цилиндр) 5, который находится соосно соленоиду (рис. 1, в). После отключения питания соленоида происходит снижение величины магнитного поля внутри проводника до определенного значения, так как в цилиндре присутствуют круговые токи, индуцируемые вихревым электрическим полем. Они рассматриваются как система вставленных друг в друга соленоидов, которые не могут возбуждать стационарное магнитное поле на внешней стороне цилиндра.

В соответствии с [2] задача определения магнитного поля $B_{звх}(r, t)$ в самом проводнике (цепочке ФМП) $r \leq b$ при $t > 0$ сводится к уравнению

$$\frac{\partial B_{звх}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma\mu_a} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_{звх}}{\partial r} \right). \quad (7)$$

где r – радиус проводника цилиндрической формы, м; t – текущее время, с.

Для рассматриваемого варианта уравнения (7) граничные условия будут: $B_{звх}(b, t) = 0$ (при $t > 0$) и, соответственно, начальные – $B_{звх}(r, 0) = B_{зв0} = \mu_a i_n$ [2]. Здесь $i_n = I/2r$ – поверхностная плотность тока проводника (ФМП), А/м [5]; I – электрический ток питания электромагнита, А.

Решение поставленной задачи (7) допускается заменой цилиндрической формы соленоида (проводника тока) на прямоугольную форму со сторонами $2b$ (рис. 1, з) [2, 4]. В соответствии с данным решением задача определения магнитной индукции и характера воздействия поля на цепочку ФМП примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_{звх}}{\partial t} &= \frac{1}{\gamma\mu_a} \left(\frac{\partial^2 B_{звх}}{\partial y^2} \right), & |y| < b, t > 0; \\ B_{звх}(-b, t) &= B_{звх}(b, t) = 0 & \text{при } t > 0; \\ B_{звх}(y, 0) &= B_{зв0} & |y| \leq b. \end{aligned} \quad (8)$$

Ее решение выполняется последовательно для одномерного уравнения диффузии в виде мультипликативных функций

$$B_{звх}(y, t) = f(t) F(y). \quad (9)$$

В результате преобразований пошагового метода разделения переменных уравнения Лапласа [4] функций $f(t)$, $F(y)$ получены зависимости

$$\frac{f'(t)}{\nu f(t)} = \frac{F''(y)}{F(y)} = -k^2. \quad (10)$$

где $\nu = 1/\gamma\mu_a$ – постоянная, м²/с; $-k^2$ – произвольная, описывающая затухающий характер квазистационарного магнитного поля в рабочем зазоре.

Преобразовав зависимости (9) и (10), получим зависимости функций

$$f_n(t) = C_n e^{-\nu k_n^2 t} \text{ и } F_n(y) = \cos k_n y, \quad (11)$$

где C_n – коэффициент разложения в ряды Фурье; n – номер пространственной гармоник; k_n – коэффициент затухания магнитного поля в рабочем зазоре, 1/м.

Поскольку искомым функциям является четной по переменной y (т.е. изменяется по косинусоидальному закону), принимаем $k_n = \left(n - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{b}$.

В соответствии с методикой [4] формально составляем ряд Фурье, подставив зависимости (11) в уравнение (8)

$$B_{звх}(y, t) = f_n(t) \cdot F_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\nu k_n^2 t} \text{cos} k_n y \quad (12)$$

Учитывая, что нулевые условия на границах $y = \pm b$ удовлетворены, для решения (11) неопределенные коэффициенты ряда определяются из начального условия – функцию представляем в виде ступенчатой периодической, в пределах $|y| \leq b$ принимающей постоянное значение $B_{зв0}$, на границах $-|y| = b, 3b, 5b, \dots$ меняющей знак на противоположный [2].

В результате составления рядов Фурье установлено, что показатели экспонент, которые имеют выше номер пространственной гармоники, затухают значительно быстрее. В соответствии с этим наибольшее влияние на процесс удержания цепочек ФМП в рабочем зазоре оказывают составляющие первой гармоники, коэффициент разложения которой равен $C_1 = (4/\pi)B_{зв0} = (4/\pi)\mu_a I_{пв} = (4/\pi)\mu_a I/2r$ [1, 2] с учетом несинусоидальности тока питания электромагнита, магнитной проницаемости и размеров частиц ФМП. В результате преобразования ряда выражение для определения магнитной индукции на поверхности и внутри цепочки-микроэлектрода примет следующий вид

$$B_{звх1}(y, t) = \frac{4}{\pi} B_{зв0} e^{-\frac{1}{\gamma\mu_a} \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 t} \cos\left(\frac{\pi}{2b}\right)y = \frac{4}{\pi} B_{зв0} e^{-\frac{t}{t_3}} \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (13)$$

где $t_3 = \gamma\mu_a (2b)^2 / \pi^2$ – время, характеризующее затухание магнитного поля в проводнике (цепочке ФМП), с.

С учетом размеров частицы ФМП (рис. 1, з) величина времени, необходимая для затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде (или проникновения на глубину частицы ФМП $l_i = b_i/2$, определяется по формуле

$$t_3 = \gamma\mu_a b_i^2 / 4$$

где b_i – размер малой оси эллипсоида, описывающего i -ю частицу ФМП, м.

На основании выполненного численного расчета выражения (13) установлено, что значение величины магнитной индукции на поверхности цепочки ФАП составляет $B_{звх1} = 0,76$ Тл, а величина времени затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде $t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ с.

Анализ выражений (13) показал, что значения магнитной индукции переменны во времени. При этом гармонический характер изменения напряженности внешнего магнитного поля приводит к изменению во времени величин силы прижима $f_{ц}$ частиц ФМП к обрабатываемой поверхности заготовки детали [10]:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (14)$$

где n – число частиц в цепочке ФМП; L_i – расстояние от границы i -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м; Δ_i, b_i – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего i -ю частицу ФМП, м; K – магнитная восприимчивость материала ФМП; B_{vi} – мгновенная индукция внешнего переменного магнитного поля на границе i -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл.

Следовательно, сила прижима $f_{ц}$ цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности

определяется размерами его частиц и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке рабочего зазора. Оно неоднородно и ограничено эквидистантными поверхностями полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью заготовки. Используемые электрические магниты, как нелинейные элементы электрической цепи в магнитной системе устройств МЭУ, генерируют индукцию B_{vi} , текущее значение которой непостоянно.

Результаты оценки влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП рассмотрим с учетом амплитудной и временной составляющих индукции. Мгновенная индукция внешнего магнитного поля в точке (x_i, y_i) цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре (рис. 1, б), изменяется по косинусоидальному закону [6, 7]

$$B_{zvi} = B_{zmi} \cos \omega t, \quad (15)$$

где B_{zmi} – амплитудная величина индукции внешнего магнитного поля в точке (x_i, y_i) цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре, Тл; ω – круговая частота магнитного поля, рад/с; t – текущее время, с.

В другой точке цепочки ФМП (x_{i+1}, y_{i+1}) индукция внешнего магнитного поля может отличаться как по амплитуде, так и по фазе:

$$B_{zvi+1} = B_{zmi+1} \cos(\omega t + \varphi), \quad (16)$$

где φ – сдвиг по фазе между векторами индукций магнитного поля B_{zvi} и B_{zvi+1} , рад.

Учитывая, что для электромагнитных катушек стандартной I-образной конструкции, питаемых током промышленной частоты, угол φ мал (порядка $5 \cdot 10^{-3}$ рад) [8] и то выражение для оценки влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП примет следующий вид:

$$\frac{B_{zvi+1} - B_{zvi}}{B_{zvi}} = \frac{B_{zmi+1} - B_{zmi}}{B_{zmi}} + \frac{\varphi}{\text{tg} \omega t}. \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет учитывать амплитудную $(B_{zmi+1} - B_{zmi}) / B_{zmi}$, временную или фазовую $(\varphi / \text{tg} \omega t)$ составляющие (рис. 1, б) индукции внешнего магнитного поля с достаточной точностью.

Для установления влияния амплитудной и фазовой составляющих индукции на силу прижима $f_{ц}$ проведены исследования и численный расчет неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 при питании электромагнита I-образной конструкции однофазным выпрямленным током по одно- и двухполупериодной схемам силой и напряжением, соответственно изменяемыми в пределах 3–5 А и 12–36 В. Эксперименты по измерению амплитудного значения индукции в рабочем зазоре выполнялись с помощью тесламетра ТИ-10 (погрешность измерения не более 2,5 %) со специальными датчиками Холла. Величина фазового сдвига магнитного потока в различных точках рабочего зазора определялась путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения [9] с использованием универсального осциллографа С1-77.

Результаты экспериментальных исследований (табл. 1) показывают, что неоднородность в рабочем зазоре наиболее характерна для переменного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по однополупериодной схеме. Амплитудная и фазовая составляющие индукции превышают в 2,25–3,0 и

2,25–2,5 раза составляющие неоднородности магнитного поля, формируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по двухполупериодной схеме. Значение постоянной магнитной индукции в 2 раза меньше величины индукции при переменном магнитном поле.

Таблица 1

Результаты исследования неоднородности внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства МЭУ

Схема питания источника магнитного поля	Среднее значение величины магнитной индукции, Тл		Фазовый сдвиг, рад.	Неоднородность магнитного поля, %	
	амплитудная	постоянная		амплитудная	фазовая
Однополупериод-	0,75	0,32	$(5-7) 10^{-3}$	6–9	18–25
Двухполупериод-	0,78	0,63	$(3-4) 10^{-3}$	2–4	8–10

Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности оказывает фазовая составляющая индукции, с увеличением частоты (100 Гц и более) питания которой ее значение снижается до нуля. При этом гармонический характер изменения величины B_{vi} , наиболее выражен для однополупериодной схемы выпрямления и определяет импульсное периодическое воздействие силы прижима $f_{ц}$ на цепочки ФМП в рабочем зазоре устройства МЭУ.

Анализ динамики изменения параметров зависимости (17) при их взаимодействии показывает, что переменные составляющие магнитной индукции влияют на силу прижима $f_{ц}$ и соответственно на стабильность и устойчивость цепочек ФМП и их электрическую проводимость в точке контакта [10]

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r_k^2 f_{ц}^{0,75}),$$

где p_f – удельное сопротивление окисной пленки, Ом·м; t_f – суммарная толщина окисной пленки, м; r_k – радиус зоны контакта, м.

Для исследования интенсивности образования цепочек ФМП под воздействием внешнего магнитного поля установлено, что магнитные поля (частотой 12,5 и 50 Гц) однородны недостаточно (рис. 2, а) последнее не обеспечивает устойчивого положения цепочек ФМП.

Исследования синхронности следования импульсов напряжений источника питания электромагнита (U_{ki}) и источника технологического тока модели Invertec V270 T (U_{ii}) в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 выполнялись с помощью осциллографа универсального С1-77. По изменению импульсов напряжения источника питания электромагнитов и источника технологического тока инверторного типа модели Invertec V270 T оценивали величину интенсивности образования во времени цепочек ФМП в рабочем зазоре и их участие в электрических разрядах с последующим переносом расплава частиц ФМП на обрабатываемую поверхность. Киносъемка процесса формирования цепочек ФМП и прохождения по ним электрических разрядов выполнялась камерой модели СКС-1М. Питание исследуемых электромагнитных катушек осуществлялось однофазным выпрямленным током по однополупериодной схеме, а также источником, обеспечивающим прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц.

Результаты осциллографических исследований показывают, что синхронность

слідования импульсов напряжения источников внешнего магнитного поля и технологического тока в рабочем зазоре затруднена вследствие питания сварочного источника инверторного типа трехфазным током (частота пульсации до 80 кГц), а электромагнитная катушка однофазным током, выпрямленным по одно- и двухполупериодной схемам (частота пульсаций 50 и 12,5 Гц соответственно). Установлено, что для электромагнитной системы источника технологического тока с электромагнитом, питание которого осуществляется выпрямленным током по однополупериодной схеме, в момент паузы тока в катушке электромагнита минимальное значение магнитной индукции не обеспечивает стабильного формирования цепочек ФМП в рабочем зазоре. Вследствие этого электрические разряды отсутствуют, процесс МЭУ протекает неустойчиво с пульсирующим горением цепочек ФМП в рабочем зазоре. Для магнитной системы с электромагнитом, питаемым током с прямоугольными импульсами частотой 12,5 Гц, изменение во времени величины индукции незначительно влияет на интенсивность образования цепочек ФМП в рабочем зазоре и перенос расплава на поверхность детали. Это объясняется небольшой пульсацией напряжения источника питания внешнего магнитного поля.

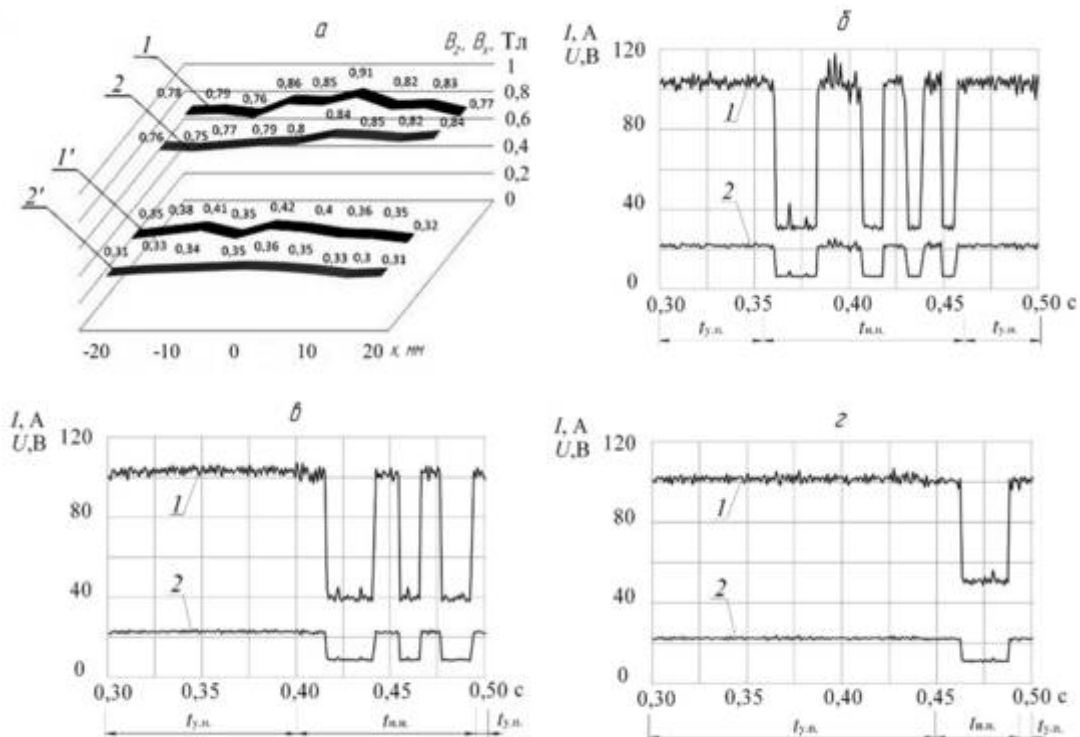


Рис. 2. Диаграммы распределения в рабочем зазоре продольной B_z (1, 2) и поперечной B_x (1', 2') составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре при частотах 50 (1, 1') и 12,5 Гц (2, 2') (а), осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) (б, в, з): $t_{y.n.}$ – участок установившегося процесса МЭУ; $t_{н.н.}$ – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ

Анализ кинограмм следования электрических разрядов в рабочем зазоре в процессе МЭУ показал, что частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса упрочнения в 2,2–2,85 раза меньше для источника технологического тока и электромагнита, питаемого напряжением частотой 12,5 Гц. Это связано с меньшими значениями переменных составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре, и обеспечивает более устойчивое положение цепочек ФМП, стабильное формирование и развитие электрических разрядов.

Для определения зависимости сплошности покрытий G от величины магнитной индукции B в рабочем зазоре и плотности разрядного тока проведены экспериментальные исследования.

Оправка с образцами из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним диаметром 16 мм и толщиной 10 мм устанавливалась в патрон установки. В момент начала вращения образцов из контейнера в рабочий зазор одновременно подавались ферромагнитный порошок Fe-2%V и смазочно-охлаждающая жидкость (эмульсол Э-2Б), включался источник технологического тока.

Независимыми переменными были технологические факторы – величина магнитной индукции в рабочем зазоре $X_1 (B_{zc})$ и плотность разрядного тока $X_2 (i)$, оказывающие основное влияние на значение магнитно- и электродинамических сил, действующих на частицы ФМП в рабочем зазоре [11].

Постоянными факторами приняты следующие: рабочий зазор $\delta = 2,0$ мм; размер частиц ФМП $\Delta = 240-320$ мкм; скорость вращения образцов $V = 0,05$ м/с; расход ФМП $q = 2,8 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); расход рабочей жидкости $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²); длина $R_{п}$, высота рабочего торца h и угол охвата полюсного наконечника α соответственно 15 мм, 5,7 мм и 12 град; ферромагнитный порошок Fe-2%V ГОСТ 9849-86; форма постоянного магнита прямоугольная с габаритными размерами 100×80×40 мм, материал ЮНДК18. Значения величины магнитной индукции в рабочем зазоре обеспечивались изменением расстояния между магнитотвердым материалом и образцами посредством перемещения постоянного магнита по направляющим пазам сердечника с полюсным наконечником.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, с использованием стандартного пакета Excel Microsoft Office, позволила получить математико-статистическую модель в нормированном виде, определяющую зависимость сплошности покрытий G от основных характеристик магнитного и электрического полей B_{zc} и i :

$$Y = 90,990 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,366 \cdot X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (20)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (20) значимы с 95%-ной доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Также установлено, что статистическая модель адекватна при 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера.

Графическое отображение модели (20) представлено одномерными сечениями функции отклика Y в двумерной системе координат (рис. 3). Анализ модели (20) позволил определить степень влияния технологических факторов на сплошность покрытий и расположить их в порядке убывания значимости: $G: B_{zc} \rightarrow i$.

На основе анализа зависимостей (рис. 3), можно сделать вывод, что для магнитной индукции в рабочем зазоре B_{zc} и плотности разрядного тока i рациональными являются диапазоны, при которых удовлетворяются следующие условия: $0,65 < B_{zc} < 0,75$ Тл и $1,80 < i < 1,95$ А/мм².

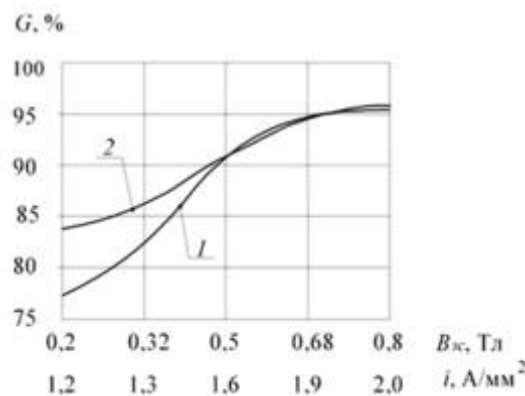


Рис. 3. Зависимость сплошности покрытий G от величины магнитной индукции I в рабочем зазоре и плотности разрядного тока 2

Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, б) показывает, что для процесса МЭУ характерно преобладание участков импульсной нестабильности, имеющих диапазон изменения разрядного тока 30–118 А (относительное отклонение тока 74,6 %). Для периодов стабильного процесса упрочнения отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 12 А (значения коэффициентов вариации плотности тока $k_{vi} = 39,3$ % и сплошности покрытий $k_{vG} = 21,4$ %).

Установлено, что повторяемость периодов стабильного процесса МЭУ и участков импульсной нестабильности одинаковая (рис. 2, в). При этом сила разрядного тока изменяется для участков импульсной нестабильности в пределах 38–102 А (относительное отклонение тока 62,7 %), для периодов стабильного процесса МЭУ отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 8 А. Значения коэффициентов вариации плотности тока k_{vi} и сплошности k_{vG} покрытий соответственно составляют 26,1 и 11,4 %.

В результате ранее принятых технологических ограничений и численного расчета с помощью математического пакета MathCAD определены величины магнитной индукции в рабочем зазоре и плотности разрядного тока. Результаты выполненных расчетов показывают, что при $B_{zc} = 0,7$ Тл, $i = 1,95$ А/мм² обеспечивается наибольшая сплошность покрытий равная, 95,1 %. Процесс МЭУ протекает стабильно с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных капель расплава. Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, г) показывает, что для МЭУ характерно преобладание периодов стабильного процесса, для которых отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 5 А. На участках импульсной нестабильности сила разрядного тока изменяется в пределах 49–101 А (относительное отклонение тока 51,5 %).

На основании выполненных экспериментальных исследований установлено, что максимальная сплошность покрытий ($G = 95,1$ %) обеспечивается при величине магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{zc} = 0,7$ Тл и плотности разрядного тока $i = 1,95$ А/мм². Установлено, что высокую стабильность процесса МЭУ и высокое качество покрытия (значения коэффициентов вариации плотности тока $k_{vi} = 26,1$ % и сплошности покрытий $k_{vG} = 11,4$ %) обеспечивают магнитотвердые материалы с рабочим зазором 2,0 мм, высотой рабочего торца полюсного наконечника 5,7 мм и углом охвата 12 град.

Таблица 2

Оптимальные режимы МЭУ

Материал ФМП	Оптимальные значения				
	i , А/мм ²	δ , мм	S , мм/об	V , м/с	q , г/(с·мм ²)
Fe-Ti	1,73	2,21	0,276	0,053	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Fe-2%V	1,87	1,55	0,185	0,057	$2,95 \cdot 10^{-3}$
ФБХ 6-2	1,91	1,50	0,220	0,055	$2,86 \cdot 10^{-3}$

где i – плотность разрядного тока, А/мм²; δ – величина рабочего зазора, мм; S – скорость подачи, мм/об; V – окружная скорость заготовки, м/с; q – расход ФМП, г/с·мм².

Результаты исследований показывают, что стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивается применением постоянного магнита. Это подтверждается исследованиями [11], в результате которых установлено, что в процессе магнитно-электрического упрочнения обеспечивается равномерное распределение по поверхности деталей расплава материала ФМП и однородность нанесенных слоев по толщине покрытий. Также выявлено, что средние значения сплошности, объемной пористости и разнотолщинности покрытий, полученных МЭУ в постоянном магнитном поле на оптимальных режимах (табл. 2) для различных композиционных ФМП (ФБХ-6-2,

Fe-2%V и Fe-Ti), находятся в пределах 91,2–98,7 %, 3,0–7,0 % и 22–48 мкм соответственно. Показано, что использование постоянных магнитов вместо электрических при МЭУ, позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий на 40,0–41,6 % и 33,3–59,3 % соответственно, несущественно увеличить сплошность покрытий на 2,0–3,4 %, обеспечить большую стабильность исследуемых параметров (значения коэффициентов вариации объемной пористости k_{VPl} , разнотолщинности k_{VPt} и сплошности k_{VG} покрытий меньше соответственно на 25,3, 28,9 и 18,1 %) [11].

Выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено влияние характера внешнего магнитного поля на изменение во времени величин силы прижима $f_{ц}$ частиц ферромагнитного порошка к обрабатываемой поверхности детали при магнитно-электрическом упрочнении и магнитно-абразивной обработке.
2. Экспериментально установлено, что наибольшую стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивают постоянные магниты с величиной индукции, равной 0,7 Тл, в рабочем зазоре 2,0 мм при высоте полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата.
3. Выявлено, что использование при магнитно-электрическом упрочнении постоянных магнитов вместо электрических позволяет снизить объемную пористость и разнотолщинность покрытий соответственно на 40,0–41,6 % и 33,3–59,3 % без существенного увеличения (на 2,0–3,4 %) сплошности.

Литература

1. Кингсеп, А.С. Основы физики. курс общей физики: учебник в 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / А.С. Кингсеп, Г.Р. Локшин, О.А. Ольхов. – М. : Физматлит, 2001. – 560 с.
2. Яковлев, В.И. Классическая электродинамика: учеб. пособие. Ч. 1. Электричество и магнетизм. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2003. – 267 с.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для студентов вузов ; в 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 2001. – 656 с.
4. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б.Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. – 480 с.
5. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2001. – 317 с.
6. Борисов, Ю.М. Электротехника: учебник для вузов / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
7. Башарин, С.А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / С.А. Башарин, В.В. Федоров. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. – 492 с.
8. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. В.Г. Герасимова [и др.]. – Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с.
9. Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов / Нефедов В.И. и [др.]; под ред. В.И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2006. – 526 с.
10. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле /

Л.М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.

11. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники : монография / Акулович Л.М., Миранович А.В. – Минск : БГАТУ, 2016. – 235 с.

Summary

Akulovich L.M., Miranovich A.V., Voroshuho O.N. Study of electromagnetic properties in the process of magnetic-electric hardening machine parts

In this article the influence of the nature of the magnetic field on process of magnetic-electric hardening of machine parts is examined. The modes of magnetic-electric hardening are set in order to obtain the highest process stability.

Keywords: magnetic-electric hardening, electromagnetic field, electromagnetic system, constant magnet, process stability, composite ferromagnetic powder.

References

1. Kingsep, A.S. Osnovy fiziki. kurs obshchej fiziki: uchebnik v 2 t. T. 1. Mekhanika, ehlektrichestvo i magnetizm, kolebaniya i volny, volnovaya optika / A.S. Kingsep, G.R. Lokshin, O.A. Ol'hov. – M. : Fizmatlit, 2001. – 560 s.
2. YAKovlev, V.I. Klassicheskaya ehlektrodinamika: ucheb. posobie. CH. 1. EHlektrichestvo i magnetizm. – Novosibirsk: Novosib. gos. un-t, 2003. – 267 s.
3. Landau, L.D. Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie dlya studentov vuzov ; v 10 t. T. VIII. EHlektrodinamika sploshnyh sred. / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M. : Nauka, 2001. – 656 s.
4. YUdaev, B.N. Tekhnicheskaya termodinamika. Teploperedacha : uchebnik / B.N. YUdaev. – M. : Vysshaya shkola, 1988. – 480 s.
5. Bessonov, L.A. Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki. EHlektromagnitnoe pole / L.A. Bessonov. – M. : Gardariki, 2001. – 317 s.
6. Borisov, YU.M. EHlektrotekhnika: uchebnik dlya vuzov / YU.M. Borisov, D.N. Lipatov, YU.N. Zorin. – M. : EHnergoatomizdat, 1985. – 552 s.
7. Basharin, S.A. Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki: Teoriya ehlektricheskikh tsepej i ehlektromagnitnogo polya : ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij / S.A. Basharin, V.V. Fedorov. – M. : Izd. centr «Akademiya», 2004. – 492 s.
8. Gerasimov, V.G. EHlektrotekhnicheskij spravochnik: v 4 t. T. 2. EHlektrotekhnicheskie izdeliya i ustrojstva / pod obshch. red. V.G. Gerasimova [i dr.]. – Izd-vo MEHI, 2003. – 518 s.
9. Metrologiya i radioizmereniya: uchebnik dlya vuzov / Nefedov V.I. i [dr.]; pod red. V.I. Nefedova. – 2-e izd., pererab. – M. : Vysshaya shkola, 2006. – 526 s.
10. Akulovich, L.M. Termomekhanicheskoe uprochnenie detalej v ehlektromagnitnom pole / L.M. Akulovich. – Polock : PGU, 1999. – 240 s.
11. Akulovich, L.M. Magnitno-ehlektricheskoe uprochnenie poverhnostej detalej sel'sko-hozyajstvennoj tekhniki : monografiya / Akulovich L.M., Miranovich A.V. – Minsk : BGATU, 2016. – 235 s.