

УДК 621.791.92:621.81

Л.М. АКУЛОВИЧ, д-р техн. наук; А.В. МИРАНОВИЧ
Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОКА
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
УПРОЧНЕНИЯ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Исследовано влияние различных типов источников технологического тока на устойчивость и производительность процесса магнитно-электрического упрочнения, а также на сплошность и разнотолщинность формируемых покрытий. Для стабилизации основных технологических параметров и повышения устойчивости процесса упрочнения предложено использовать инверторные источники импульсного технологического тока.

Ключевые слова: магнитно-электрическое упрочнение, источник технологического тока, композиционный ферромагнитный порошок, устойчивость процесса, сплошность и разнотолщинность покрытий

Введение. Современные технологии упрочнения и восстановления пустотелых и нежестких деталей машин в условиях ремонтных предприятий основаны на воздействии на упрочняемую поверхность концентрированными потоками энергии. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП) [1, 2]. Наряду с достоинствами (высокая прочность сцепления покрытия с основой, отсутствие термической деформации и специальной предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей) для МЭУ присущи следующие недостатки: разнотолщинность и пористость покрытий; микротрещины и окислые включения в упрочненных слоях; повышенная шероховатость обработанных поверхностей [2, 3].

На стабильность показателей качества формируемых покрытий и производительность МЭУ преимущественное влияние оказывают параметры электрических и магнитных импульсов (энергия импульса, длительность, частота следования и др.), генерируемые применяемыми электромагнитными системами (ЭМС) [4, 5]. Стабильность процесса МЭУ определяется параметрами ЭМС, которые помимо ориентации частиц ФМП и формирования из них токопроводящих цепочек в рабочем зазоре, обеспечивают интенсивное тепловыделение в местах контакта с поверхностью детали при электрических разрядах. Диапазон значений параметров ЭМС, обеспечивающий стабильность МЭУ, ограничивается технологическими возможностями источника технологического тока (ИТТ).

Постановка задачи. Стабильность процесса МЭУ в ранее проведенных исследованиях [6–8] определялась визуально по групповому горению цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре и (или) по осциллограммам параметров ИТТ. При этом анализировались только внешние формы осциллограмм технологического тока и напряжения без привязки к качеству формируемых покрытий и производительности МЭУ.

Поэтому *цель настоящего исследования* — определить влияние ИТТ с различными вольт-амперными характеристиками на стабильность процесса МЭУ, его производительность, качество и микроструктуру формируемых покрытий. Для достижения указанной цели были поставлены задачи: оценить стабильность процесса нанесения покрытий при МЭУ по осциллограммам электрических параметров и результатам статистичес-

кой обработки их экспериментальных значений; исследовать стабильность показателей качества (сплошность, разнотолщинность), микроструктуру покрытий и производительность его нанесения.

Методика проведения исследований. Нанесение покрытий из ФМП на образцы из стали 45 выполняли на установке МЭУ модели УНП-1. Исследовали два варианта компоновочных схем ЭМС: постоянный магнит (ПМ) и сварочный выпрямитель трансформаторного типа (модель ВД-306), ПМ и сварочный источник инверторного типа (модель Invertec V270 T). Питание разнотипных источников технологического тока осуществлялось трехфазным током промышленной частоты. МЭУ выполнялось на следующих технологических режимах: сила технологического тока $I = 110$ А; рабочий зазор $\delta = 1,5$ мм; окружная скорость заготовки $V = 0,06$ м/с; подача ФМП $q = 2,9 \cdot 10^{-3}$ г/(с·мм²); величина магнитной индукции в рабочем зазоре $B_s = 1,0$ Тл; размер частиц ФМП $\Delta = 240 \div 320$ мкм; расход рабочей жидкости (смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) — 5-процентный раствор эмульсола Э2 в воде) $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²).

Измерения силы тока в пределах $0,01 \div 150$ А и напряжения в пределах $0,01 \div 80$ В выполнялись осциллографом универсальным С1-77 ТУ И22.044.077. Запись осциллограмм технологического тока и напряжения велась на самопишущем приборе Н-307/1 ТУ 25-0445.048-85. Частота следования импульсов электрических сигналов измерялась частотомером электронносчетным ЧЗ-54.

Производительность МЭУ определялась по приращению массы наносимого материала ФМП (двухкомпонентного легированного порошка на основе железа Fe-10%V) в единицу времени. Взвешивание образцов и ФМП выполнялось на лабораторных весах ВЛА-200 2М с точностью до 0,001 г. Измерение толщины и оценка сплошности покрытий осуществлялись на шлифах поперечного среза при помощи светового микроскопа Mef-3 фирмы Reichert-Jung (Австрия) при увеличении в 200 раз. Разнотолщинность покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца. Сплошность определялась как отношение длины участков с покрытием к общей протяженности исследуемого участка, выраженное в процентах [9]. В процессе исследования параметров качества покрытий изучалось по 5 наиболее характерных участков одного образца с покрытием.

Изучение микроструктуры покрытий из ФМП Fe-10%V осуществлялось на пяти образцах (кольца 40×16×12 из стали 45) с применением светового микроскопа Mef-3 с диапазоном увеличения 100÷1000 раз, цифрового фотоаппарата HP Photosmart 715 Digital Camera.

Для выполнения статистической обработки экспериментальных данных в качестве показателя стабильности процесса МЭУ принят коэффициент вариации силы технологического тока, характеризующий отклонение исследуемого электрического параметра ИТТ от средних значений [10, 11]:

$$k_{vj} = \frac{\sigma_I}{I_{д.ср.}} \cdot 100\%,$$

где $\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (i_d - I_{д.ср.})^2 / (n-1)}$ — среднеквадратичное отклонение отдельного результата измерения; i_d — действительное значение тока в i -й момент, А; $I_{д.ср.}$ — среднее значение тока за n измерений, А; n — число измерений.

Достоверность результатов определения производительности МЭУ, сплошности и разнотолщинности покрытий обеспечивалась многократным (до 50 раз) измерением, а их точность оценивалась как среднее арифметическое значение [12, 13]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где x_i — результат i -го измерения.

Стабильность исследуемых параметров качества формируемых покрытий и производительности МЭУ в работе определялась коэффициентом вариации по формуле [11, 14]:

$$k_{vi} = \frac{\sigma_i}{M(\Pi)} \cdot 100\%,$$

где $M(\Pi)$ — математическое ожидание i -го исследуемого параметра.

Для оценки сплошности и разнотолщинности покрытий в качестве математического ожидания $M(\Pi)$ в работе использовалось среднее арифметическое значение экспериментов \bar{x} .

По результатам статистической обработки исследуемых параметров определялся максимально стабильный процесс МЭУ, которому соответствовало минимальное значение коэффициентов вариации [11, 14].

Обсуждение результатов исследований. Анализ осциллограмм (фрагменты представлены на рисунке 1) показывает, что стабильный процесс МЭУ характеризуется регулярной сменой стадий образования коротких замыканий электродов цепочками ФМП и возбуждения электрических разрядов (участок установившегося процесса кривой тока — $t_{у.п.}$). Выявлено, что в периоды стабильного протекания процесса МЭУ отклонения силы тока от среднего значения 110 А для инверторного и трансформаторного сварочных ИТТ составляют 18 и 30 А соответственно.

Наличие участков нестабильности обусловлено импульсным изменением проводимости рабочего зазора, периодическими колебаниями напряжений в электрической сети и в ИТТ. Следует отметить, в процессе упрочнения возникают периоды холостого хода сварочных ИТТ (участок импульсной нестабильности процесса кривой тока — $t_{и.н.}$) с отклонениями силы тока 78 и 100 А соответственно от среднего значения 110 А. Задержки электрических разрядов и переход к стадии хо-

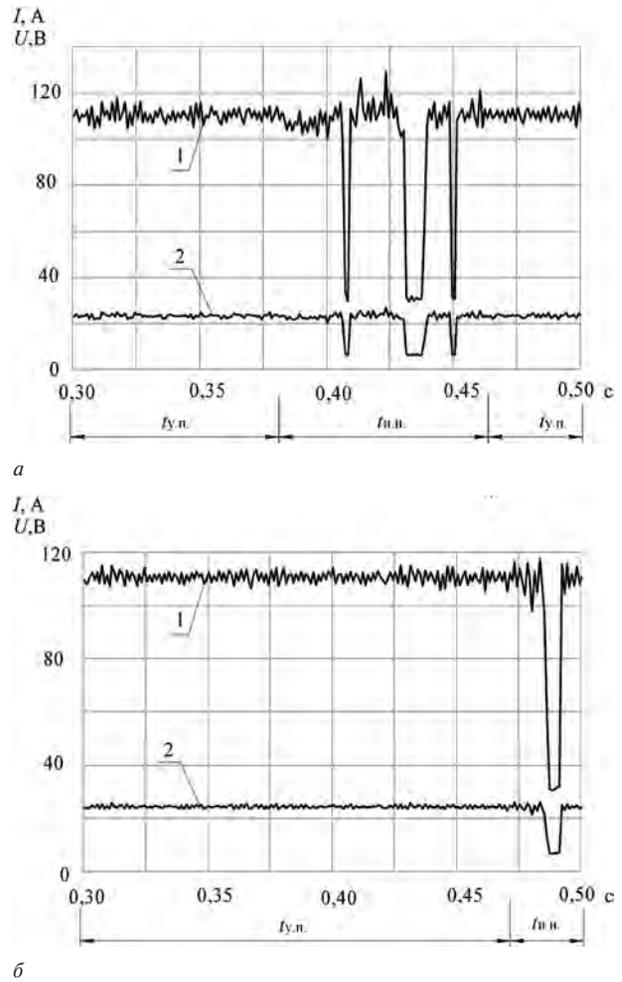


Рисунок 1 — Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2): $t_{у.п.}$ — участок установившегося процесса МЭУ; $t_{и.н.}$ — участок импульсной нестабильности процесса МЭУ для сварочного выпрямителя модели ВД-306 (а) и инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T (б)

лостного хода ИТТ вызваны неравномерностью подачи ФМП в рабочий зазор из бункера-дозатора.

Экспериментально установлено, что наименьшая частота повторяемости импульсной нестабильности процесса МЭУ характерна для ЭМС с ИТТ инверторного типа. Так, сварочный источник модели Invertec V270 T в сравнении со сварочным выпрямителем модели ВД-306 обеспечивает на 14÷32 % меньшую частоту повторяемости участков импульсной нестабильности процесса МЭУ и снижение на 5,7÷14,8 % отклонений силы тока от среднего значения.

Результаты расчетов (таблица 1) показывают, что значение коэффициента вариации силы тока k_{vj} для инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T на 8,6 % меньше, чем для сварочного выпрямителя модели ВД-306. Следовательно, более стабильный процесс МЭУ обеспечивается применением ИТТ инверторного типа.

Это обстоятельство подтверждается результатами исследования показателей качества покрытий и производительности процесса МЭУ (таблица 2). Статистическая оценка экспериментальных значений исследуемых параметров показывает, что значения коэффициентов вариации производительности $k_{вп}$, сплошности $k_{вг}$ и разнотолщинности $k_{вр}$ покрытий на 13,9; 25,1 и 17, % соот-

Таблица 1 — Статистическая оценка стабильности процесса МЭУ

Источник технологического тока модели	Количество измерений, n	Среднеквадратичное отклонение силы тока $\sigma_{i, A}$	Среднее значение силы тока $I_{д.ср.}, A$	Значение коэффициента вариации $k_{v,i}, \%$
ВД-306	100	34,5	89,1	38,7
Invertec V270 T	100	32,0	90,4	35,4

Таблица 2 — Статистическая оценка показателей качества покрытий и производительности процесса МЭУ

Источник технологического тока модели	Производительность процесса МЭУ			Средняя разнотолщинность покрытий			Средняя сплошность покрытий					
	Значение показателя, мг/мин	Значения статистических показателей		Значение показателя, мкм	Значения статистических показателей		Значение показателя, %	Значения статистических показателей				
		\bar{x} , мг/мин	$\sigma_{i,}$ мг/мин		$k_{v,п}, \%$	\bar{x} , мкм		$\sigma_{i,}$ мкм	$k_{v,п}, \%$	$\bar{x}, \%$	$\sigma_{i,} \%$	$k_{v,с}, \%$
ВД-306	210,5	209	28,1	13,5	68,0	64,6	12,2	18,6	90,2	88,1	14,5	16,5
Invertec V270 T	216,0	212	24,6	11,6	62,0	61,6	9,5	15,4	92,5	91,4	11,3	12,4

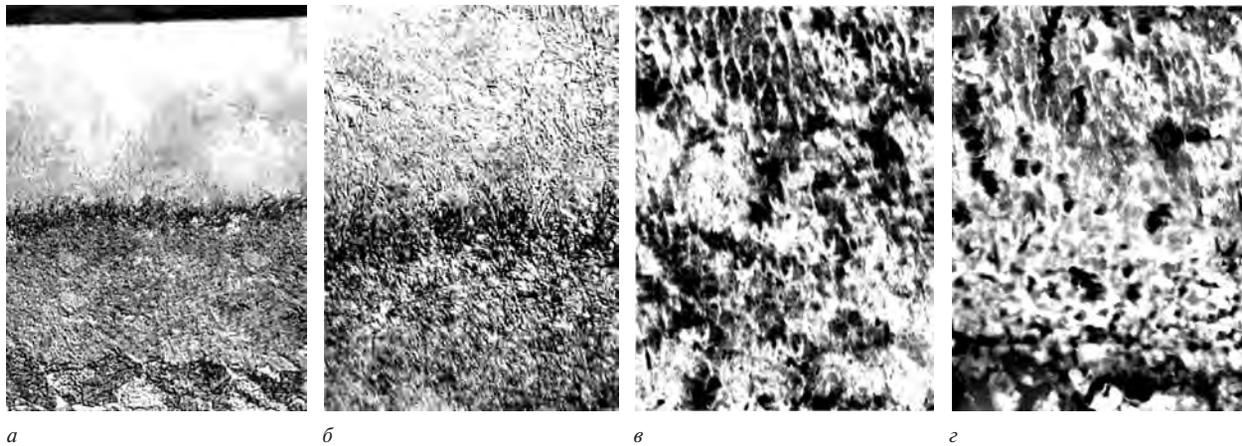


Рисунок 2 — Фотографии микроструктуры покрытий из ФМП Fe-10%V: а, б — оптическая металлография, поперечный шлиф, $\times 200, \times 500$; в, з — растровая электронная микроскопия различных участков, $\times 5000$

ветственно меньше для инверторного ИТТ модели Invertec V270 T, чем для сварочного выпрямителя модели ВД-306.

Анализ микроструктуры поверхностного слоя (рисунок 2 а) показывает, что он состоит из трех зон — монолитного слоя расплава ФМП, переходного слоя и термического влияния (ЗТВ). В нетравленном виде в покрытиях, полученных МЭУ композиционным ферропорошком Fe-10%V, не выявлено дефектов в виде окислов, раковин и посторонних включений. Наружная часть покрытия (см рисунок 2 в), полученного МЭУ, имеет равноосное ячеистое строение, а на границе с основной (см. рисунок 2 з) — столбчатое дендритно-ячеистое, которое ориентировано в направлении максимального теплоотвода (перпендикулярно поверхности образца). Структура нанесенного металла состоит из основы — твердого раствора ванадия в α -железе, а также небольшого количества остаточного аустенита, карбидов ванадия ($V_2C, V_4C_{2,67}$) и железа (FeC, FeC_8). Поверхности раздела (см. рисунок 2 а и б), расположенные между нанесенными слоями и основой, четко обозначены. При этом ЗТВ (см. рисунок 2 з) имеют структуру дислокационного мартенсита. Под ЗТВ находится зона неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося троостомартенсита.

Выводы. 1. Установлено, что использование в процессе МЭУ инверторного источника позволяет по сравнению с традиционными сварочными аппаратами уменьшить импульсную нестабильность технологического тока и напряжения.

2. Электромагнитная система, состоящая из постоянных магнитов и инверторного сварочного источника модели Invertec V270 T, обеспечивает минимальное значение коэффициентов вариации исследуемых параметров, повышает производительность МЭУ сплошность покрытий на 2,5 %, снижает среднюю разнотолщинность покрытий и коэффициент вариации силы технологического тока на 9,0 и 8,6 % соответственно.

3. Выявлено, что микроструктура покрытия из композиционного ферромагнитного порошка Fe-10%V имеет мелкодендритное строение с равномерным распределением легирующих элементов.

Список литературы

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. — Полоцк: ПГУ, 1999. — 240 с.
2. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын [и др.]. — Минск: ФТИ НАНБ, 1997. — 416 с.

3. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А.П. Ракомсин; под общ. ред. П.А. Витязя. — Минск: Парадокс, 2000. — 201 с.
4. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. — Минск: БГАТУ, 2016. — 236 с.
5. Акулович, Л.М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л.М. Акулович, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец. — Минск: Народная кн., 2008. — 236 с.
6. Абрамов, В.И. Исследование технологического процесса упрочнения деталей ферропорошками в пульсирующем магнитном поле: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В.И. Абрамов. — Минск, 1982. — 180 с.
7. Борисов, Б.П. Исследование и разработка процесса магнитоэлектрического упрочнения деталей машин в условиях фазового сдвига активирующих факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Б.П. Борисов; ФТИ АН БССР. — Минск, 1983. — 19 с.
8. Люцко, В.А. Технология и установки магнитно-электрического упрочнения плоских поверхностей деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Люцко; ПГУ. — Новополоцк, 2004. — 24 с.
9. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский [и др.]. — М.: Мир, 2004. — 384 с.
10. Милютин, В.С. Источники питания для сварки: учеб. пособие / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. — М.: Айрис Пресс. — 2007. — 384 с.
11. Ланкин, Ю.Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Ю.Н. Ланкин // Автоматическая сварка. — 2011. — № 1. — С. 7–15.
12. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.
13. Смирнов, В.А. Прикладная статистика в пакете анализа MS Excel: учеб. пособие / В.А. Смирнов. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 88 с.
14. Метрология и радиоизмерения: учеб. для вузов / В.И. Нефедов и [др.]; под ред. В.И. Нефедова. — 2-е изд., перераб. — М.: Высш. шк., 2006. — 526 с.

Akulovich L.M., Miranovich A.V.

Influence of technological current parameters on the productivity of the magnetic and electric hardening process and surface quality

Paper studies the influence of various types of technological current sources on the process of magnetic and electric hardening stability and productivity, as well as on the continuity and thickness of the formed coatings. To stabilize the main technological parameters and increase the stability of the hardening process, it is offered to use inverter sources of pulsed technological current.

Поступила в редакцию 06.07.2020.