

УДК 621.793

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ НА КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ

**Л.М. Акулович, д.т.н., профессор, А.В. Миранович**

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*В статье рассмотрено влияние параметров технологического тока на устойчивость процесса электромагнитной наплавки и качество формируемых покрытий. Для стабилизации основных технологических параметров и повышения устойчивости наплавки предложено использовать инверторные источники импульсного технологического тока.*

Известно [1, 2], что одним из эффективных способов нанесения износостойких покрытий с требуемыми физико-механическими свойствами является электромагнитная наплавка (ЭМН) композиционными ферромагнитными порошками (КФП). Достоинства способа ЭМН (высокая прочность сцепления покрытия с основой, отсутствие термической деформации и специальной предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей) обусловили его эффективное использование для восстановления и упрочнения поверхностей тонкостенных и крупногабаритных деталей, износ которых не превышает 0,1 мм, а также для поверхностей, работающих в открытой абразивной среде.

Вместе с тем, ограничивающим фактором ЭМН на поверхности, износ которых превышает 0,1 мм (валы коробок передач автомобилей, тракторов и других машин), является использование в качестве источника технологического тока (ИТТ) сварочных аппаратов генераторного и трансформаторного типов [2, 3]. При этом наибольшее распространение в устройствах ЭМН получили источники питания постоянного технологического тока – сварочные выпрямители (например, ВД-306, ВД-401 и др.) [4]. Существенными недостатками их являются невысокая скорость регулирования величины энергии технологического тока, малая величина энергии электрических импульсов и нестабильность их возникновения в периоды изменения напряжения сети. Опыт эксплуатации таких типов ИТТ показывает, что в процессе ЭМН невозможно достичь стабильности формирования покрытий с качественными характеристиками (равномерность и однородность по толщине) и высокой производительностью [3].

Появившиеся в последние годы инверторные источники питания для дуговой сварки (например, модельного ряда Invertec) по сравнению с выпрямителями традиционной конструкции обладают высоким быстродей-

ствием за счет микропроцессорной системы регулирования силой импульсного технологического тока и позволяют значительно упростить управление устройствами ЭМН [5, 6].

Цель работы – установить влияние параметров технологического тока различных типов ИТТ на устойчивость процесса ЭМН, его производительность, толщину и равномерность (колебания) толщины покрытий.

Методика исследований заключалась в нанесении покрытий из КФП Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2 на образцы из стали 45 ГОСТ 1050 – 88 (наружный диаметр – 40 мм, внутренний – 16 мм, толщина – 10 мм) на установке ЭУ-5 с различными типами ИТТ (трансформаторный выпрямитель – ВД-306 и инверторный выпрямитель – Invertec V270 T). Режим ЭМН: сила тока  $I = 110$  А; рабочий зазор  $\delta = 2,0$  мм; скорость вращения заготовки  $V = 0,06$  м/с; подача КФП  $q = 2,9 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>); расход рабочей жидкости (РЖ) – эмульсол Э-2Б  $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>). Устойчивость процесса ЭМН определялась по нестабильности (относительным отклонениям от установленных значений) технологического тока и напряжения в процессе работы установки ЭУ-5 с различными типами ИТТ. Электрические измерения напряжения в пределах 0,01 ... 100 В, силы тока в пределах 0,01 ... 270 А и временном интервале  $0,1 \times 10^{-6}$  ... 0,02 с выполнялись осциллографом универсальным С1-77 ТУ И22.044.077. Измерение толщин покрытий осуществлялось на шлифах поперечного среза при помощи оптического микроскопа, имеющего диапазон увеличения  $\times 200$ . Равномерность (колебания) толщины покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца [7]. Производительность ЭМН определялась по приращению массы наплавляемого материала КФП. Масса исходных образцов – 106,0 г. Взвешивание образцов и КФП выполнялось на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,10 мг. Значение показателей для данных условий ЭМН определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

В результате выполненного осциллографирования (рисунок 1) установлено, что устойчивый процесс ЭМН характеризуется периодически повторяющимися процессами образования коротких замыканий и возбуждения электрических разрядов. В процессе наплавки возникают периоды холостого хода, которые образуются из-за несовпадения во времени импульсов электрических ИТТ и магнитной индукции электромагнитов. Выявлено, что в периоды устойчивого процесса наплавки при среднем значении силы технологического тока 110 А амплитуда силы разрядного тока изменяется для инверторного (Invertec V270 T) и диодного выпрямителей (ВД-306) в пределах 104 ... 116 А и 102 ... 122 А соответственно. В периоды неустойчивого процесса ЭМН сила разрядного тока для инверторного и диодного выпрямителей изменяется в широких пределах 32 ... 115 А и 30 ... 130 А

соответственно. При этом наименьшая частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса ЭМН характерна для инверторного аппарата, возможно, по причине малых пульсаций технологического тока (не более долей процента). Следовательно, более стабильный процесс ЭМН обеспечивается применением выпрямителя Inverter V270 T.

Это обстоятельство подтверждается результатами исследования равномерности распределения толщины покрытий. Анализ результатов измерений (таблица 1) показал, что толщина покрытий, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с ИТТ ВД-306 и Inverter V270 T, находится в пределах 229,0 ... 270,0 мкм и 237,0 ... 279,0 мкм соответственно.

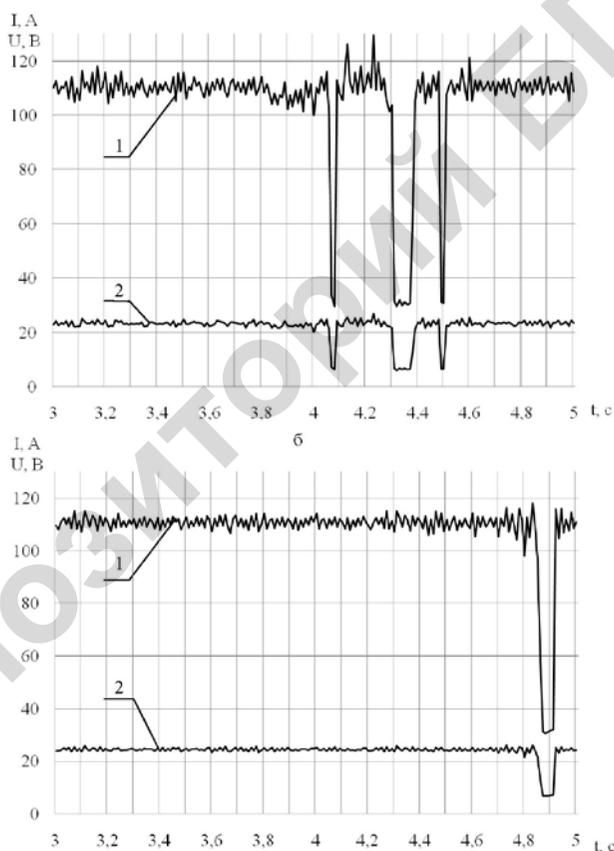


Рисунок 1 – Осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) процесса ЭМН с использованием трансформаторного выпрямителя ВД-306 (а) и инверторного выпрямителя Inverter V270 T (б)

**Секция 1: Технический сервис  
машин и оборудования**

Таблица 1 – Толщина покрытий и равномерность толщины покрытий из КФП, производительность ЭМН

Материал покрытия	Средняя толщина покрытия, мкм	Колебания толщины покрытия, мкм	Производительность ЭМН, мг	Средняя толщина покрытия, мкм	Колебания толщины покрытия, мкм	Производительность ЭМН, мг
	ВД-306			Invertec V270 T		
Fe-2%V	270,0	41,0	210,5	279,0	30,0	216,5
Fe-Ti	229,0	55,0	192,6	237,0	41,0	202,4
ФБХ-6-2	267,0	46,0	212,8	274,0	34,0	220,2

Установлено, что наибольшая толщина наблюдается для покрытий из ферромагнитных порошков Fe-2%V и ФБХ-6-2, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с Invertec V270 T, а колебания толщины на 25,1 ... 26,8 % меньше по сравнению с аналогичной характеристикой покрытий, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с ВД-306. Более равномерная толщина покрытий, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с Invertec V270 T, свидетельствует о стабильности процесса ЭМН.

Анализ результатов измерений (таблица 1) показал, что в процессе ЭМН с применением ИТТ инверторного типа по сравнению с ИТТ трансформаторного производительность ЭМН повысились на 2,7 ... 4,8 %.

В результате проведенных исследований установлено, что инверторный источник питания обеспечивает наименьшую импульсную нестабильность технологического тока и напряжения в процессе ЭМН и превосходит по техническим и технологическим показателям традиционные сварочные аппараты. Выпрямитель модели Invertec V270 T принят в качестве источника постоянного технологического тока для установки ЭМН.

Изучение влияния стабилизированных параметров (магнитной индукции и технологического тока) процесса ЭМН на структуру и открытую пористость проводилось на образцах с покрытиями из КФП Fe – 2%V. Для каждого опыта покрытия были нанесены на установке УНП-1 с электромагнитной системой на постоянных магнитах и выпрямителем модели Invertec V270 T на пять образцов. Образцы представляли собой кольца (D×d×h) 40×16×12 из стали 45 ГОСТ 1050 – 88, микроструктура которых в исходном состоянии – смесь феррита и сорбитообразного перлита. Оптимальные условия и режим наплавки принимался на основе данных источника [8].

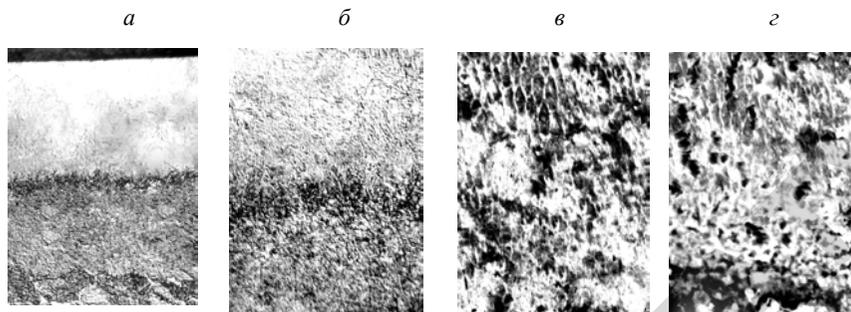
При исследовании микроструктуры покрытий использовали световой микроскоп Mef-3 с диапазоном увеличения 100 ... 1000 раз, фирмы «Reichert-Jung», цифровой фотоаппарат «HP photosmart 715 digital camera». Изучение открытой пористости образцов проводилось на поверхности покрытий нетравленных микрошлифов. Исследование выполнялось на автома-

тическом анализаторе изображения «Mini MagiScan» фирмы «Joyce Loebel» с компьютерной обработкой данных по программе количественного анализа.

Анализ фотографий микроструктуры покрытий из композиционного ферропорошка Fe – 2%V (рисунок 2, а) позволил установить, что наплавленный слой состоит из двух зон – наплавленного покрытия (ЗНП) и термического влияния (ЗТВ). Покрытие представляет собой монолитный слой, полученный из множества капель расплава порошка.

В нетравленном виде в покрытиях, полученных наплавкой композиционного ферропорошка Fe – 2%V с использованием МС на ЭМ и ПМ (рисунок 2), не выявлено дефектов в виде окислов, раковин и посторонних включений. Микроструктуры наплавленных металлов мелкодендритного строения. Наружная часть покрытия (рисунок 2, в), полученного наплавкой, имеет равноосное ячеистое строение, а на границе с основой (рисунок 2, г) – столбчатое дендритно-ячеистое, которое ориентировано в направлении максимального теплоотвода (перпендикулярно поверхности образца). Структура наплавленного металла состоит из основы – твердого раствора ванадия в  $\alpha$ -железе, а также небольшого количества остаточного аустенита, карбидов ванадия ( $V_2C$ ,  $V_4C_{2,67}$ ) и железа ( $FeC$ ,  $FeC_8$ ). Поверхности раздела (рисунок 2, а и б), расположенные между наплавленными слоями и основой, четко обозначены. При этом ЗТВ (рисунок 2, г) имеют структуру дислокационного мартенсита. Под ЗТВ находится зона неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит.

Анализ результатов исследований (таблица 2) показал, что открытая пористость покрытий, полученных наплавкой на установке с магнитной системой на постоянных магнитах, находится в пределах 3,0 ... 6,0 %. Это свидетельствует о работоспособности покрытий, в особенности, при трении с ограниченной смазкой, так как поры являются аккумуляторами смазочного материала. Меньший предел значений открытой пористости покрытий, обеспечивается за счет уменьшения градиента плотности подводимого теплового потока и скорости охлаждения покрытий. Это достигается при следующем режиме наплавки: расход рабочей жидкости  $q = 0,9 \cdot 10^3 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$ ; плотность разрядного тока  $i = 1,65 \text{ А/мм}^2$ ; величина рабочего зазора  $\delta = 1,5 \text{ мм}$ ; скорость подачи  $S = 0,15 \text{ мм/об}$ ; окружная скорость заготовки  $V = 0,050 \text{ м/с}$ ; расход КФП  $q = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ г/с} \cdot \text{мм}^2$ .



а, б – оптическая металлография, поперечный шлиф  $\times 200$ ,  $\times 500$ ;  
в, г – растровая электронная микроскопия различных участков  $\times 5000$   
Рисунок 2 – Фотографии микроструктуры покрытий из ферропорошка  
Fe – 2%V

Таблица 2 – Открытая пористость покрытий из ферропорошка Fe – 2%V

Материал покрытия	Открытая пористость, %		
	min	max	средняя
Fe-2%V	3,0	6,0	4,5

### Заключение

1. Установлено, что наибольшая толщина наблюдается для покрытий из ферромагнитных порошков Fe-2%V и ФБХ-6-2, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с Invertec V270 T, а колебания толщины на 25,1 ... 26,8 % меньше по сравнению с аналогичной характеристикой покрытий, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с ВД-306. Более равномерная толщина покрытий, полученных наплавкой на установке ЭУ-5 с Invertec V270 T, свидетельствует о стабильности процесса ЭМН.

2. Выявлено, что микроструктуры наплавленных металлов мелкодендритного строения. Показано, что у покрытий, полученных наплавкой с магнитной системой на постоянных магнитах, распределение легирующих элементов равномерное.

3. Показано, что открытая пористость покрытий из Fe-2%V, полученных наплавкой с использованием установок с магнитной системой на постоянных магнитах, находится в пределах 3,0 ... 6,0 %.

### Литература

1. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Под ред. П. А. Витязя. – Мн.: Парадокс, 2000. – 201 с.
2. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.

3. Акулович, Л. М. Об устойчивости электромагнитной наплавки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, А. В. Линник // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.- техн. конф. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», 2012. – С. 98 – 100.

4. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Ракомсин А. П. и др. – Мн.: Изд-во ФТИ, 1997. – 416 с.

5. Солодский, С. А. Источники питания для дуговой сварки : учеб. пособие / С. А. Солодский, О. Г. Брунов, Д. П. Ильященко. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2012. – 165 с.

6. Толстых, Л. Г. Инверторные источники питания для дуговой сварки / Л. Г. Толстых, А. Л. Толстых, А. А. Вопнерук // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 9. – С. 29 – 31.

7. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский и [др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

8. Акулович, Л. М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л. М. Акулович, А. В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58 – 65.

#### **Abstract**

*The article considers the influence of process parameters on the stability of the current process and the quality of electromagnetic welding formed coatings. To stabilize the main technological parameters and increasing sustainability surfacing proposed to use inverter technology pulsed current sources.*