

УДК 621.973

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ НА КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ**

Акулович Л.М., д.т.н., профессор, **Миранович А.В.**, ст. преподаватель
Белорусский государственный аграрный технический университет

Известно [1], что одним из способов восстановления эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей пустотелых деталей, износ которых не превышает 0,1 мм, является нанесение износостойких покрытий из ферромагнитных порошков (ФМП) электромагнитной наплавкой (ЭМН). Однако этот способ не используется для восстановления поверхностей, износ которых составляет более 0,15 мм, из-за неравномерности и неоднородности покрытия по толщине [2]. Устранить этот недостаток возможно за счет разработки электромагнитных систем (ЭМС), обеспечивающих согласованную во времени частоту и фазу следования импульсов напряжений источников технологического тока (ИТТ) и внешнего электромагнитного поля (ЭМП) [3].

Результаты ранее проведенных исследований [3] показывают, что переменная составляющая напряженности внешнего ЭМП, генерируемого электромагнитом (ЭМ), вызывает импульсное изменение электрической проводимости цепочек-микроэлектродов из частиц ФМП (1). Это приводит к неоднородному распределению ФМП в рабочем зазоре и адекватному изменению величины технологического тока (2).

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r^2 f_u^{0,75}), \quad (1)$$

где R_i – сопротивление в контакте; p_f – удельное сопротивление оксидной пленки; t_f – суммарная толщина оксидной пленки; r – радиус зоны контакта; f_u – сила, прижима частицы ФМП к упрочняемой поверхности.

$$i_{cp} = \frac{1}{R} (E - U_\delta \frac{t_\delta}{t_{um}}), \quad (2)$$

где R – активное сопротивление цепи в период короткого замыкания; E – э.д.с. источника технологического тока; U_δ – напряжение дугового разряда; t_δ и t_{um} – длительности периодов дугового разряда и импульсов соответственно.

На основании зависимостей (1 и 2) выявлена возможность управления тепловым воздействием на восстанавливаемую поверхность и ФМП посредством стабилизации основных технологических параметров процесса наплавки (магнитной индукции внешнего ЭМП и величины технологического тока), которая представлена в виде математической модели процесса ЭМН (3).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_{nn}}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_{nn} \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / c_{nn} p_{nn}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{I^2 R_i(t)}{\Delta S} \right] / c_p; \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_o}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_o \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / c_o p_o; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где c_n, c, c_n – удельные теплоемкости материалов полюсного наконечника, ФМП и детали соответственно; p_n, p, p_n – удельные электрические сопротивления; $\lambda_n, \lambda, \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности; θ_c – температура окружающей среды; I – сила тока дуги.

Результаты исследований показывают [3, 4], что изменение от нуля до амплитудного значения магнитной индукции в сравнении с ее постоянной величиной снижает значения

контактных сопротивлений цепочек-микроэлектродов ФМП и частоту возникновения электрических разрядов на 30%. Экспериментальное подтверждение получено путем киносъемки камерой СКС-1М процесса формирования цепочек-микроэлектродов и прохождения по ним электрических разрядов. На основании этого для стабилизации процесса нанесения износостойких покрытий предложено использовать в устройствах электромагнитной наплавки ЭМС с постоянными магнитами, а в качестве ИТТ – сварочный инвертор модели Invertec V270 T.

Экспериментальные исследования по определению оптимальных технологических параметров процесса ЭМН по критериям производительности и износостойкости, установлению закономерности их влияния на стабильность процесса выполнялись на установке УНП 1. Толщина покрытий определялась на шлифах поперечного среза при помощи оптического микроскопа ($\times 200$). Равномерность (колебания) толщины покрытий выявлялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образцов. Оценка сплошности покрытий осуществлялась с применением лупы ЛП-1-7 \times ГОСТ 25706-83 и фотографий поперечного среза шлифов.

В качестве выходных параметров были приняты производительность процесса Q (приращение массы покрытия) и относительная износостойкость покрытия ϵ . Независимыми переменными приняты следующие факторы: плотность разрядного тока i , А/мм²; величина рабочего зазора δ , мм; скорость подачи S, мм/об; окружная скорость заготовки V, м/с; расход ФМП q, г/с·мм², а постоянными – магнитная индукция в рабочем зазоре $B_3=0,7$ Тл; размер зерен ФМП $\Delta= 240 - 320$ мкм; расход рабочей жидкости $q=0,4 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²); смазочно-охлаждающая жидкость – 5%-й раствор товарного эмульсола Э2 в воде. Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Оптимальный технологический режим ЭМН определяли для двухкомпонентных легированных порошков на основе железа Fe – 2% V, Fe – Ti (ГОСТ 9849 – 86) и высокоуглеродистого порошкового сплава ФБХ 6-2 (ГОСТ 11546 – 75).

Установлено, что по степени влияния на производительность процесса технологические параметры процесса ЭМН можно выстроить в ряд $Y_1=Q: V \rightarrow S \rightarrow i \rightarrow q \rightarrow \delta$; по износостойкости – в ряд $Y_2=\epsilon: S \rightarrow i \rightarrow V \rightarrow q \rightarrow \delta$.

Оптимальные режимы процесса наплавки ФМП (таблица) определены с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона, методом спирального покоординатного спуска.

Таблица – Оптимальные режимы ЭМН

ФМП	Оптимальные значения факторов				
	i , А/мм ²	δ , мм	S, мм/об	V, м/с	q, г/(с·мм ²)
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	$2,86 \cdot 10^{-3}$
Fe-Ti	1,73	2,21	0,276	0,053	$2,86 \cdot 10^{-3}$

Результаты проведенных экспериментальных исследований синхронности следования импульсов тока, напряжения и их формы от источников внешнего ЭМП и технологического тока в рабочем зазоре установки УНП 1 с помощью осциллографа универсального С1-77 ТУ И22.044.077 показывают, что процесс ЭМН ФМП на оптимальных режимах идет стабильно с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных вкраплений. При этом преобладают периоды стабильности процесса, имеющих относительное отклонение технологического тока в пределах 2,7 ... 5,2 %.

Установлено, что средняя сплошность, неравномерность толщины и объемная пористость покрытий, полученных ЭМН ФМП Fe – 2% V, Fe – Ti и ФБХ 6-2, находится в пределах 90,9 – 98,2 %, 17,1 – 29,5 % и 3,0 – 7,0 % соответственно.

На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что электромагнитная система установки УНП 1 на основе постоянных магнитов стабилизирует тех-

нологические параметры процесса ЭМН, обеспечивает равномерность и однородность покрытий по толщине.

Литература

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Ракомсин, А.П. ; под ред. П. А. Витязя. – Минск : Парадокс, 2000. – 201 с.
3. 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.
4. Акулович, Л. М. Исследование влияния стабилизированных параметров электромагнитной наплавки на износостойкость покрытий / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия : С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2014. – С. 17 – 28.

УДК 621.923

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ КОНТУРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ
ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**Акулович Л.М., д.т.н., профессор, Сергеев Л.Е., к.т.н., доцент,
Сенчуров Е.В., ст. преподаватель**

Белорусский государственный аграрный технический университет

Повышение стойкости пуансонов в основном зависит от качества их рабочих поверхностей и, например, установлено, что направление штрихов на этих поверхностях оставленных режущим инструментом при финишной обработке должно быть параллельно течению или движению материала штампуемой детали [1].

Для финишной обработки пуансонов чаще всего используется полирование, однако этот способ характеризуется высокой долей ручного труда и вследствие этого резко отличными друг от друга результатами. Одним из видов такой обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2-4]. Основное достоинство МАО заключается в возможности нивелирования режущего контура инструмента относительно профиля обрабатываемой детали, однако эффективность абразивной способности ферроабразивной «щетки» проявляется на уровне длины цепочек частиц ферроабразивного порошка (ФАП) от 3 до 10 мм. В ряде случаев для интенсивной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин необходимо создание такого контура полюсных наконечников электромагнитной системы (ЭМС), который имеет эквидистантное по отношению к детали или приближенное к нему положение. Проблема распределения электромагнитного поля (ЭМП) в рабочем зазоре часто решается использованием метода сеток или интуитивным способом, требующим высокой квалификации специалистов. Однако грамотное конструктивное решение, полученное аналитическим или графическим способом, обеспечивает однородность ферроабразивной «щетки» и градиента магнитной индукции в зоне обработки, что гарантирует отсутствие разницы давления ФАП на различных участках обрабатываемой детали. Поэтому с целью повышения производительности и качества обработки пуансонов для глубокой вытяжки металла следует обеспечить наибольшую конформность, т.е. полноту прилегания поверхности инструмента к поверхности детали в области их контакта и произвести переход от интуитивного понимания топографии ЭМП к ее объемному и однозначному восприятию, имеющему алгебраическое выражение. Для многих поверхностей получение непрерывных аналитических описаний по целому ряду причин в условиях производства является не всегда возможным решением и поэтому геометрическая информация сопряжена не с функциональным, а дискретным характе-