

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Л.М. Кожуро, докт. техн. наук, профессор, Л.С. Герасимович, докт. техн. наук, профессор, академик НАН Беларуси, А.В. Крутов, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ)

Аннотация

В работе приводятся результаты исследования устойчивости процесса электромагнитной наплавки (ЭМН) при восстановлении и упрочнении деталей машин. Рассмотрены электрические схемы замещения установки ЭМН, проанализированы различные значения их динамического сопротивления.

Введение

Для восстановления и упрочнения деталей машин весьма перспективными являются электрофизические методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, таких как электронные и лазерные лучи, низкотемпературная плазма, импульсные разряды тока и другие. Электромагнитная наплавка является одним из этих методов. Она формирует тонкие слои покрытий до 0,5 мм. К достоинствам её следует отнести высокую прочность соединения наплавленного покрытия с основой, повышенную износостойкость, минимальное теплотребление и расплавление материала основы, что исключает термическое деформирование обрабатываемых поверхностей деталей. ЭМН эффективна при восстановлении и упрочнении посадочных поверхностей под подшипники качения, зубчатые колеса, шкивы, муфты и другие детали. Электромагнитная наплавка является ресурсо- и энергосберегающим методом нанесения износостойких покрытий из композиционных материалов на основе железа. Но переменные во времени параметры нагрузки (сопротивление, индуктивность, емкость и др.) существенно влияют на качество наплавки. Задача статьи – определить факторы, которые могут быть выбраны для автоматического управления процессом наплавки.

Основная часть

Установлено [1], что сила разрядного тока при ЭМН оказывает большое влияние на производительность процесса наплавки и износостойкость покрытия, так как величина тока определяет количество теплоты, подводимой в зону наплавки, фазовые и структурные превращения в покрытии и основе, а также глубину диффузии элементов ферропорошка в материал основы. Например, для деталей диаметром 20...40 мм, при значениях тока менее 60А процесс неустойчив, формируется покрытие недостаточной толщины и качества. С увеличением разрядного тока повышается мощность разряда, что приводит к росту толщины покрытия, износостойкости, уменьшению шероховатости поверхности. Но при токах более 140А наблюдается перегрев поверхности вплоть до оплавления отдельных участков, процесс превращается в электродугу

наплавку. Для устойчивого процесса ЭМН требуется величина тока от 120 до 140А при напряжении 24В. Величина тока зависит от зазора между электромагнитным наконечником и деталью, скорости подачи ферропорошка в зону наплавки.

Необходимо отметить, что производительность процесса ЭМН и качество формируемого покрытия зависят не только от количества энергии, поступающей от источника питания в рабочую зону наплавки, но и от характера изменения этой энергии во времени [2]. Изменение проводимости разрядного промежутка приводит к тому, что электрическая цепь наплавки все время находится в нестационарном режиме, что обуславливает колебания величины рабочего тока.

Для аналитического исследования в данной работе были проанализированы экспериментальные результаты неустойчивости тока и напряжения в процессе электромагнитной наплавки, полученные на установке ЭУ-25 с источником питания ВД-401. Электрические измерения проводились с использованием осциллографа цифрового запоминающего СЗ-40. Форма осциллограмм (рис.1) показывает, что ток наплавки и напряжение, несмотря на источник питания постоянного тока, изменяются с некоторой амплитудой колебаний, близким к синусоидальным. При этом отмечаются участки, как со стабильным, так и неустойчивым процессами наплавки. Процесс

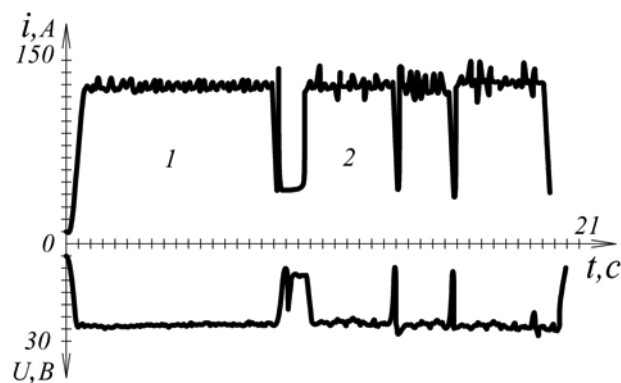


Рисунок 1. Осциллограммы тока наплавки и напряжения: 1 – стабильный процесс наплавки; 2 – неустойчивый процесс наплавки

устойчивого горения дуги (наплавки) имеет быстро-текущий колебательный характер. Прекращение наплавки или ее затухание обусловлены изменением напряжения источника питания, уменьшением скорости подачи ферропорошка, увеличением расстояния между наконечником магнитопровода и деталью. И с другой стороны, уменьшение зазора наплавки, увеличение скорости подачи ферропорошка приводит к короткому замыканию и прожогам детали. Поэтому важно все эти взаимосвязанные факторы учитывать при разработке системы управления процессом наплавки.

Представим установку и процесс электромагнитной наплавки схемой замещения (рис.2). Пусть U – напряжение источника питания; i – ток наплавки; R, L – активное сопротивление и индуктивность, характеризующие создание магнитного потока в зоне наплавки; u_d – напряжение электрической дуги. Известно, что электрическая дуга обладает нелинейной падающей вольтамперной характеристикой, а источник питания – падающей линейной вольтамперной характеристикой (зависимости 1 и 2 на рис.3).

Согласно второму закону Кирхгофа для электрической цепи схемы замещения установки ЭУ-25 (рис.2) запишем дифференциальное уравнение

$$iR + L \frac{di}{dt} + u_d = U \quad \text{или} \quad i(R + R_d) + L \frac{di}{dt} = U, \quad (1)$$

где R_d - нелинейное сопротивление дуги.

Уравнение (1) – неоднородное дифференциальное. Его решение имеет вид:

$$i(t) = i_y + i_{ce} = i_y + Ce^{pt},$$

где i_y - установившаяся составляющая тока; i_{ce} - свободная составляющая тока; C – постоянная интегрирования.

При установившемся режиме наплавки ток в цепи не должен изменяться, т.е. $\frac{di}{dt} = 0$. Рабочие точки

процесса наплавки будут А и В, когда вольтамперные характеристики 1 и 2 (рис.3) пересекаются. Рассмотрим, в какой из этих точек процесс наплавки будет устойчив. Для этого решим дифференциальное уравнение (1). Корень характеристического уравнения

будет $p = -\frac{R + R_d}{L}$, а установившийся ток

$$i_y = \frac{U}{R + R_d}.$$

Для определения постоянной интегрирования C используем независимые начальные условия при $t=0$. Тогда

$$i(0) = i_y + Ce^{p0}. \quad (2)$$

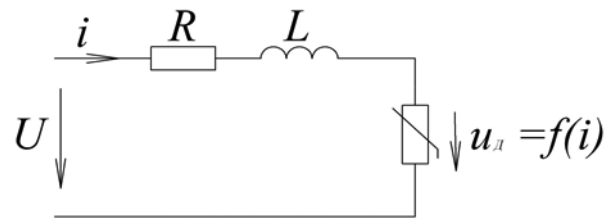


Рисунок 2. Электрическая схема замещения установки ЭМН

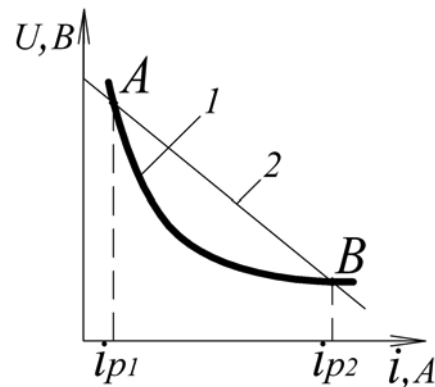


Рисунок 3. Вольтамперные характеристики дуги (1) и источника питания (2)

Согласно первому закону коммутации $i(0) = i(0_-) = i(0_+) = 0$, так как до начала электромагнитной наплавки ток в цепи отсутствует. Поэтому выражение (2) можно записать в виде

$$0 = \frac{U}{R + R_d} + C, \quad \text{из которого постоянная интегрирования}$$

$C = -\frac{U}{R + R_d}$. Следовательно, ток, изменяющийся во времени при ЭМН будет определяться зависимостью:

$$i(t) = \frac{U}{R + R_d} (1 - e^{pt}). \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что если корень характеристического уравнения

$$p = -\frac{R + R_d}{L} < 0, \quad \text{т.е. когда} \quad \frac{R + R_d}{L} > 0, \quad \text{то}$$

при $t \rightarrow \infty$ ток $i(t)$ будет равен $i_y = \frac{U}{R + R_d} = i_{p2}$,

а при $p > 0$, т.е. когда $\frac{R + R_d}{L} < 0$, то ток изменится от равновесного состояния i_{p1} до тока короткого замыкания. В последнем случае $p > 0$ будет иметь место при динамическом сопротивлении

$R_D = \frac{du}{di} < 0$, т.е. когда наклон прямой 2 меньше наклона кривой 1 (рис.3), что имеет место в точке А. Эта точка является точкой неустойчивого равновесия. Неустойчивое состояние образуется и при резком снижении напряжения источника питания. В этом случае ток дуги стремится к нулю. Устойчивому состоянию ЭМН соответствует точка В, при которой корень характеристического уравнения отрицателен, сопротивление $R + R_D$ всей цепи положительно.

Из рис.1 видно, что в цепи не устанавливается постоянный ток, а возникают практически синусоидальные автоколебания с частотой, близкой к ω_{ce} - резонансной частоте. Можно полагать, что при анализе процесса устойчивости ЭМН следует учитывать наличие паразитной емкости, которая обусловлена наличием зазора между деталью и наконечником электромагнита, токоведущих изолированных проводов и деталей установки, по которым протекает ток. Поэтому в схему замещения (рис. 2) включим конденсатор емкостью C , тогда получим новую схему замещения (рис. 4). С учетом того, что токи утечки по изоляции значительно меньше тока наплавки, можно считать проводимость изоляции равной нулю и в новой схеме замещения соответствующее сопротивление не показывать.

Далее запишем систему уравнений по законам Кирхгофа для новой схемы:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i = 0, & (4) \\ i_1 R + L \frac{di}{dt} + u_D = U, & (5) \\ L \frac{di}{dt} + u_D = u_C. & (6) \end{cases}$$

В уравнении (6) u_C – напряжение на емкости. Осуществив соответствующие подстановки, с учетом того, что ток $i_2 = C \frac{du_C}{dt}$ получим неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$RLC \frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + RC \frac{du_D}{dt} + iR + u_D = U. \quad (7)$$

Для схемы на рис.4 резонансная частота может быть определена из выражения $\omega_{ce}^2 = \frac{R + R_D}{RLC}$.

$$\text{Введем обозначение } \delta = \frac{1}{2RC} + \frac{R_D}{2L}.$$

Тогда корни характеристического уравнения (7) будут равны

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 + \omega_{ce}^2}.$$

Анализ решения уравнения (7) показывает, что если $\omega_{ce}^2 > 0$, то устойчивость характеризуется точкой В (рис.3) и процесс наплавки устойчив. При этом корни α_1 и α_2 могут быть вещественными или комплексными, а $\delta > 0$. При положительном значении δ мы можем утверждать, что энергия магнитного поля преобладает над энергией электрического поля и образуется электрическая дуга, расплавляющая ферропорошок в зазоре между восстанавливаемой поверхностью детали и наконечником магнитопровода [3]. Вопросы управления процессом ЭМН были рассмотрены в [2, 4].

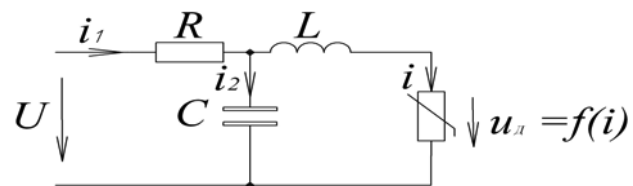


Рисунок 4. Электрическая схема замещения установки ЭМН с учетом паразитной емкости

Выводы

Проведенные результаты аналитических исследований позволяют разработать алгоритм управления устойчивостью работы установки ЭМН для поддержания оптимального режима наплавки покрытия с учетом, как динамики процесса, так и взаимосвязанных параметров нагрузки и источника питания. В качестве фактора управления выбрана величина динамического сопротивления электрической цепи. Значение динамического сопротивления должно поддерживаться положительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле/ П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, А.П. Ракомсин [и др.]. – Мн.: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
2. Кожуро, Л.М. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве/ Л.М. Кожуро, А.В. Крутов, П.С. Чистосердов//Монография. – Мн.: БелНИИ внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2003. – С. 177-181.
3. Теоретические основы электротехники: в 3 т. /К. С. Демирчян [и др.].– Спб.: Питер, 2004. – Т.2: Теория нелинейных электрических и магнитных цепей.– 576 с.
4. Кожуро, Л.М. Управление комбинированным методом электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием/ Л.С. Герасимович, Л.М. Кожуро, А.В. Крутов //Агропанорама, №6, 2000. – С. 8-10.