

УДК 621.771.07.001.5

Самотугіна Ю. С., Джелалі В. О.

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПЛАЗМОВИМ МОДИФІКУВАННЯМ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЧАВУННИХ ВИРОБІВ

Розроблена система адаптивного управління процесом плазмового модифікування масивних деталей з чавуну. Встановлено, що використання сучасних систем управління дозволяє отримувати математичну модель процесу модифікування на базі стандартних САП-продуктів.

Встановлено, що блок вимірювання температурного поля в зоні обробки (тепловізор) можна використовувати у складі системи управління. Сучасні засоби контролю, які включають електронні та оптичні засоби вимірювання, дозволяють контролювати технологічні параметри процесу в реальному масштабі часу.

Ключові слова: чавун, плазмове модифікування, математична модель, адаптивне управління.

Постановка проблеми. Багато масивних литих частин обладнання коксохімічного, аглодоменного, прокатного виробництв виготовляються з чавуну. Для підвищення працездатності чавунних виробів практично не використовуються методи об'ємної термічної обробки через високу крихкість чавуну і ризик великих внутрішніх напружень. У зв'язку з цим дуже перспективна розробка нових технологій поверхневого зміцнення, особливо локальних – окремих найбільш зношених ділянок робочої поверхні чавунних виробів. Ці технології включають обробку поверхні за допомогою висококонцентрованого плазмового струменя як джерела нагріву.

Суть плазмового поверхневого модифікування металів полягає в термічних фазових і структурних перетвореннях, що відбуваються при швидкому і концентрованому нагріванні робочої поверхні плазмовим струменем і відведення тепла в матеріал деталі [1].

Актуальність розробки нових підходів до управління процесами плазмового модифікування обумовлена як необхідністю вдосконалення технології, так і розвитком сучасних комп'ютерних систем управління, побудованих, як правило, на базі мережевих програмуючих логічних контролерів і промислових комп'ютерів.

Традиційний підхід до управління процесами включає наступні етапи: розрахунок режимів обробки на основі функціональних моделей, формування програм, що управляють процесом, синтез регуляторів за необхідними параметрами. Відомі підходи, які базуються на побудові теоретичної математичної моделі процесу, визначенні цільової функції та вирішенні проблеми оптимізації. Мета оптимального управління – знайти оптимальний варіант. Недоліком такого підходу є ігнорування стохастичної природи реального технологічного процесу.

Мета (завдання) дослідження. З урахуванням рекомендацій [2] при вирішенні практичних задач управління плазмовим модифікуванням необхідно використовувати системний підхід, який включає розрахунок оптимальних параметрів управління на основі математичної моделі і коригування параметрів режиму обробки за результатами обробки інформації в режимі реального часу з датчиків. При такому підході можна виділити дві

складові управління: технологічну програму, яка управляє процесом, що розроблена на основі математичної моделі, і комплекс програмно-апаратних засобів адаптивного управління, які дозволяють адаптувати технологічний процес плазмового модифікування до реальних умов, адекватно реагувати на дії збурення.

Автоматизація технологічного процесу, який охоплює великий комплекс фізико-хімічних процесів, на основі комп'ютерних технологій відкриває нові можливості управління. З розвитком мікропроцесорних пристроїв і локальних обчислювальних мереж вдалося створити цілісну технологічну систему обробки даних процесу [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для випадків плазмового модифікування масивних виробів з чавуну можна використовувати відоме розв'язування рівняння теплопровідності при нагріванні поверхні напівнескінченного тіла потужним швидко рухомим нормально-круговим джерелом тепла [1-3]. Для точок, розташованих на центральній осі від місця нагрівання, що відповідає центральній осі плазмового струменя, рівняння зміни температури виглядає так:

$$T(z_0, t) = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda v} \cdot \frac{e^{-\frac{z_0}{4at}}}{\sqrt{t(t_0+t)}}, \quad (1)$$

де q – ефективна питома потужність плазмового нагріву;

v – швидкість обробки;

$t_0 = \frac{1}{4ak}$ – постійна часу нагріву;

k – коефіцієнт зосередженості плазмового струменя;

z_0 – координата відстані від поверхні;

t – час нагрівання.

З рівняння (1) випливає, що для кожного типу оброблюваного матеріалу основними параметрами, визначальними температуру нагрівання в точках зміцненої зони, є ефективна теплова потужність плазмового нагріву і швидкість обробки v .

Відповідно до закону нормального розподілу Гауса ефективна теплова потужність плазмового нагріву (або т. зв. питомий тепловий потік) в залежності від радіуса плями нагріву r описується виразом:

$$q(r) = q_m e^{-kr^2}, \quad (2)$$

де q_m – максимальна щільність потоку на осі струменя.

Таким чином, плазмовий струмінь можна розглядати як нормально-кругове джерело теплоти з параметрами q_m і k , які пов'язані з ефективною тепловою потужністю співвідношенням:

$$q = q_m \cdot \frac{\pi}{k}, \quad (3)$$

Для підвищення ефективності плазмового модифікування необхідно максимально можливе збільшення коефіцієнта зосередженості плазмового струменя k і максимально

можливе зменшення площі плями нагріву, діаметр якого з умови $q_m \left(\frac{d_n}{2}\right) = 0,05q_m$ пов'язан з k співвідношенням [4]:

$$q_m = 3,46\sqrt{k}. \quad (4)$$

Попередніми дослідженнями було встановлено [5], що діаметр плями нагріву, в площині якої питомий тепловий потік з достатньою для практичних цілей точністю можна вважати постійним і висловлюваним залежністю (2), дорівнює діаметру отвору сопла плазмотрона d_c . У даних дослідженнях параметр d_n підтримувався постійним: $d_n = d_c = 6$ мм.

Ефективна питома потужність плазмового нагріву визначається формулою:

$$q = \eta_T \cdot \eta_c \cdot q_0, \quad (5)$$

де η_T – термічний ККД плазмотрона, який визначається калориметруванням або розрахунком; для плазмотрона непрямої дії з секціонованою міжсекційною вставкою при $d_c = 6$ мм в робочому діапазоні зміни режимів η_T змінюється в межах від 0,48 (при $I = 400$ А) до 0,56 (при $I = 200$ А);

η_c – ККД плазмового струменя – враховує втрати тепла на ділянці сопло – виріб, згідно [6] при малій дистанції обробки ($h = 5$ мм) η_c близький до 100 %. Тому з достатньою для практичних цілей точністю можна прийняти $\eta_c = 0,98$.

$q_0 = I \cdot U$ – потужність, підведена до струменя;

I – сила струму плазмової дуги;

U – напруга на дузі. Параметр U є залежним від I відповідно до вольт-амперної характеристики плазмотрона [3].

Крім питомої теплової потужності плазмового нагріву q , на величину максимальної температури нагріву поверхні T_{max} , яка визначається як перша приватна похідна ∂T за часом ∂t (з формули 1), сильно впливає швидкість переміщення плазмотрону (тобто швидкість плазмової обробки v).

Таким чином, з вищевикладеного випливає, що тепловкладання в матеріал (чавун) при плазмовому модифікуванні (при незмінних конструктивних параметрах плазмотрону) визначається двома незалежними параметрами режиму обробки – величиною струму дуги I і швидкістю обробки v .

Основний матеріал дослідження. Сучасна система управління, яка виконана на базі промислового комп'ютера і програмованих контролерів, дозволяє реалізувати:

- математичну модель процесу на базі стандартних САП-продуктів (універсальних кінцево-елементних пакетів для вирішення теплофізичних завдань) [7];

- алгоритми адаптивного управління по інформації від датчиків зворотного зв'язку для коректування керуючої програми в реальному масштабі часу. Стохастичний характер процесу плазмового модифікування враховується організацією адаптивних зворотних зв'язків, що істотно підвищує якість управління.

Схема управління процесом плазмової обробки на базі математичної моделі і принципів адаптивного управління представлена на рис. 1. Сучасні засоби контролю, які включають електронні та оптичні засоби вимірювання, дозволяють контролювати технологічні параметри процесу в реальному масштабі часу.

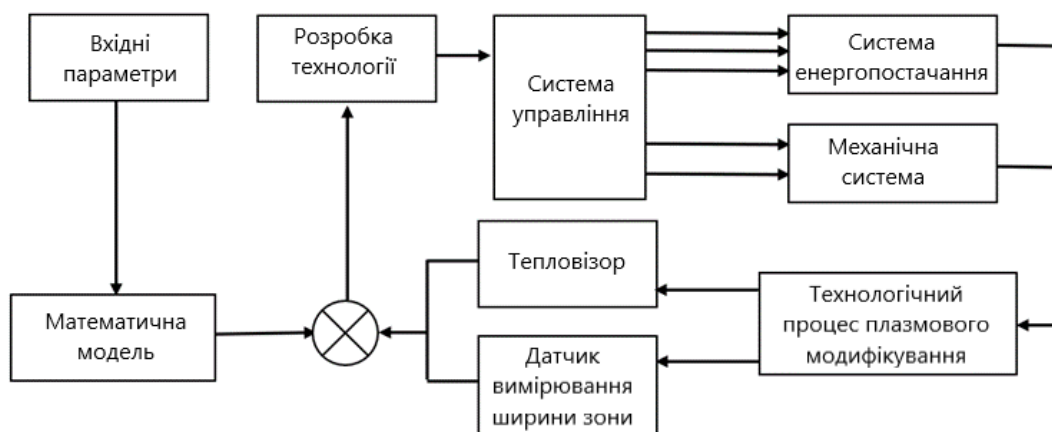


Рисунок 1 – Схема адаптивного управління процесом плазмового модифікування на базі математичної моделі

У складі системи управління можна використовувати блок вимірювання температурного поля в зоні обробки (тепловізор). Оптична камера, спрямована на зону обробки, обробляє сигнали, пропорційні енергії струменя, і передає по цифровому протоколу інформацію в комп'ютер.

ВИСНОВКИ

Розроблено систему адаптивного управління процесом плазмового модифікування масивних виробів з чавуну. Встановлено, що використання сучасних систем управління дозволяє отримувати математичну модель процесу модифікування на базі стандартних САП-продуктів.

Список використаних джерел:

1. *Самотугина, Ю. С.* Выбор оптимальных режимов плазменного поверхностного упрочнения деталей металлургического оборудования из высокопрочного чугуна / *Ю. С. Самотугина, Е. И. Иванов, Б. А. Ляшенко* // *Металл и литье Украины.* – 2005. – № 7-8. – С. 79–83.
2. *Залого, В. А.* Имитационное моделирование процесса прерывистого резания керамическими инструментами, упрочнёнными ионно-лучевой имплантацией: постановка задачи / *В. А. Залого, Д. В. Криворучко, В. Я. Лебедев* // *Резание и инструмент в технологических системах.* – 2008. – № 75. – С. 123–127.
3. *Самотугин, С. С.* Плазменное упрочнение инструментальных материалов / *С. С. Самотугин, Л. К. Лецинский.* – Донецк : Новый мир, 2002. – 338 с.

4. Рыкалин, Н. Н. Расчет теплового потока при нагреве тела плазменной струей / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, И. Д. Кулагин // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 1–5.
5. Оптимизация режимов плазменной обработки инструмента / С. С. Самогугин, О. Ю. Нестеров, А. Г. Ярмицкий, В. П. Иванов // Сварочное производство. – 1998. – № 7. – С. 12–15.
6. Николаев, А. В. Плазменно-дуговой нагрев вещества / А. В. Николаев // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М. : Наука, 1973. – С. 20–32.
7. Самогугіна, Ю. С. Плазмове модифікування деталей та інструменту з високовуглецевих сплавів / Ю. С. Самогугіна. – Маріуполь : ПДТУ, 2017. – 178 с.

Самогугина Ю. С., Джелали В. О.

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЛАЗМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЧУГУННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Разработана система адаптивного управления процессом плазменного модифицирования массивных деталей из чугуна. Установлено, что использование современных систем управления позволяет получать математическую модель процесса модифицирования на базе стандартных САП-продуктов.

В настоящее время перспективна разработка новых технологий поверхностного упрочнения отдельных наиболее изнашиваемых участков рабочей поверхности чугунных деталей. Эти технологии включают обработку с использованием в качестве источника нагрева высококонцентрированную плазменную струю.

Актуальность разработки новых подходов к управлению процессом плазменного модифицирования обусловлена как необходимостью усовершенствования технологии, так и развитием современных компьютерных систем управления, построенных, как правило, на базе сетевых программирующих логических контроллеров и промышленных компьютеров.

Известны подходы, которые базируются на построении теоретической математической модели технологического процесса, определении целевой функции и решении задачи оптимизации. Цель оптимального управления – нахождение наилучшего из множества возможных вариантов. Недостатком такого подхода является пренебрежение стохастической природы реального технологического процесса.

При решении практических задач управления плазменным модифицированием необходимо использовать системный подход, который включает расчет оптимальных параметров управления на основе математической модели и корректирование параметров режима модифицирования по результатам обработки информации в режиме реального времени.

Исследованиями установлено, что в составе системы управления можно использовать блок измерения температурного поля в зоне обработки (теповизор). Оптическая камера, направленная на зону обработки, обрабатывает сигналы, пропорциональные энергии струи, и передает по цифровому протоколу информацию в компьютер.

Ключевые слова: *чугун, плазменное модифицирование, математическая модель, адаптивное управление.*

Samotugina Yu. S., Dzhelali V. O.

SYSTEM FOR ADAPTIVE CONTROL OF THE PROCESS OF PLASMA MODIFICATION OF MASSIVE CAST IRON PARTS

A system for adaptive control of the process of plasma modification of massive cast iron parts has been developed. It has been found out that the use of modern control systems makes it possible to obtain a mathematical model of the modification process on the basis of standard SAP products.

At the present, the development of new technologies for surface hardening of some of the most worn parts of the working surface of cast iron products is promising. These technologies include surface treatment with a highly concentrated plasma jet as a heat source.

The urgency of developing new approaches to the management of plasma modification processes is due to the need to improve technology and the development of modern computer control systems, built, as a rule, on the basis of network programmable logic controllers and industrial computers.

There are known approaches that are based on the construction of a theoretical mathematical model of the process, the definition of the objective function and the solution of the optimization problem. The purpose of optimal management is to find the best option. The disadvantage of this approach is ignoring the stochastic nature of the real technological process.

When solving practical problems of plasma modification control, it is necessary to use a system approach, which includes the calculation of optimal control parameters based on a mathematical model and adjustment of processing mode parameters based on the results of real-time information processing.

Researchers have found that as part of the control system, you can use the unit for measuring the temperature field in the treatment area (thermal imager). The optical camera, aimed at the processing area, processes signals proportional to the energy of the jet, and transmits information via digital protocol to a computer.

Keywords: *cast-iron, plasma modification, mathematical model, adaptive control.*

Рецензент: професор, д-р техн. наук Анділахай О. О.

Стаття надійшла 25 листопада 2020 р.