

Xác định ngược thông lượng nhiệt cực đại và kích thước hàn điểm bằng laser

Inverse determination of maximum heat flux and welding size in laser spot welding

Nguyễn Quân^{1,*}, Nguyễn Như Tùng², Bùi Gia Thịnh^{3,4},
Nguyễn Quốc Mạnh⁴, Đỗ Anh Tuấn⁴

¹Trường Đại học Phạm Văn Đồng

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Trường Đại học Hải Phòng

⁴Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên

*Email: nquan@pdu.edu.vn

Tel: +84-437655121-321; Mobile: 0972300600

Tóm tắt

Từ khóa:

Hàn laser, thông lượng nhiệt, thiết lập ngược, kích thước mối hàn

Trong nghiên cứu này, thông lượng nhiệt cực đại và kích thước mối hàn điểm laser được thiết lập bằng phương pháp ngược tuần tự. Điểm thuận lợi của phương pháp đề xuất đó là dạng hàm của thông lượng nhiệt không cần biết trước và quá trình thiết lập thông lượng nhiệt được thực hiện từng bước thời gian cho đến thời điểm kết thúc khảo sát. Một trường hợp tổng quát với thông lượng nhiệt cực đại là một hàm số mũ theo thời gian gia nhiệt được khảo sát. Kết quả thiết lập thể hiện rằng thông lượng nhiệt cực đại của tia laser được thiết lập bằng phương pháp ngược có một sự xấp xỉ rất tốt so với giá trị chính xác. Dựa trên kết quả thiết lập thông lượng nhiệt, kích thước chiều rộng và chiều sâu của mối hàn cũng được thiết lập chính xác.

Abstract

Keywords:

Laser welding, heat flux, inverse estimation, welding size.

In this work, the maximum heat flux and the welding size of laser spot welding are estimated by the inverse sequential method. The advantages of this method are that the function form for the unknown laser heat flux is not necessary to be preselected and the heat flux estimation process is performed time step by time step until the end of the process. A general case with the maximum laser heat flux being the exponential function of heating time was investigated. The estimated results showed that the maximum laser heat flux inversely estimated by the proposed method have good approximation to the exact value. Based on the results of the estimated heat flux, the welding width and depth in the spot laser welding was also determined accurately.

Ngày nhận bài: 08/8/2018

Ngày nhận bài sửa: 07/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

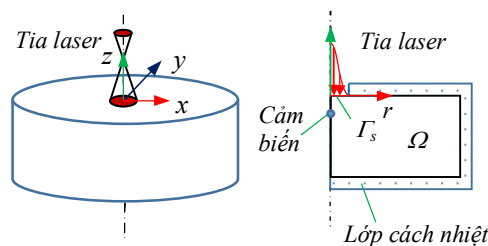
1. GIỚI THIỆU

Tia laser được xem như một nguồn nhiệt có năng lượng rất lớn với khoảng điều chỉnh cường độ năng lượng rất rộng là linh hoạt. Hay nói cách khác, tia laser có thể làm bốc hơi bất kỳ loại vật liệu nào và cũng có thể cung cấp một lượng nhiệt mong muốn cho một vật nào đó. Đặc biệt, laser được xem là một nguồn nhiệt dễ tạo ra và rất linh hoạt trong ngành công nghiệp tự động. Do vậy, laser được nhìn nhận như một công nghệ hiện đại đối với các quá trình gia công và xử lý vật liệu như: tôi cứng bề mặt, hàn, khoan, tạo hình,... [1].

Từ những nghiên cứu trong [2-4], chúng ta thấy rằng thông lượng nhiệt cực đại tia laser là thông số quan trọng trong quá trình hàn laser. Để đạt chất lượng mối hàn, chúng ta phải xác định được thông lượng nhiệt này. Từ đó, điều khiển các thông số đầu vào hợp lý để đạt được chất lượng mối hàn. Trong thực tế, thông lượng nhiệt cực đại tia laser rất khó xác định trực tiếp. Cách hiệu quả để xác định hệ số này là sử dụng phương pháp ngược (inverse method).

Trong quá khứ, vài nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp ngược để thiết lập thông lượng nhiệt cũng như hệ số hấp thụ trong quá trình liên quan bằng laser [5-7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên chỉ dừng lại ở quá trình tôi cứng bề mặt. Trong quá trình này, nhiệt độ cao nhất của vật liệu nằm trong khoảng nhiệt độ kết tinh (solidification) của vật liệu. Giá trị ở nhiệt độ này vẫn còn rất thấp so với quá trình hàn. Do vậy, những đặc tính nhiệt của vật liệu (material thermal properties) có thể xấp xỉ là hằng số. Nói một cách khác, các vấn đề trong các nghiên cứu [5-7] được xem như là những vấn đề tuyến tính. Đối với quá trình hàn, vật liệu chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng, vì vậy đặc tính nhiệt của vật liệu ở những trạng thái này rất khác nhau. Vì vậy, chúng ta không thể xấp xỉ hằng số cho những đặc tính nhiệt của vật liệu trong quá trình hàn. Hơn nữa, đặc tính nhiệt giữa pha rắn và pha lỏng có sự thay đổi rất đột ngột. Có thể nói, những vấn đề liên quan đến quá trình hàn là những bài toán có tính phi tuyến rất cao. Do vậy, các phương pháp trong [5-7] có thể không thể mở rộng để sử dụng cho các quá trình hàn được. Gần đây, Nguyen và Yang [8] đã đề xuất một phương pháp tuần tự (sequential method) để xác định thông lượng nhiệt cực đại và hệ số hấp thụ trong mô hình nhiệt một chiều. Điểm nổi bật của phương pháp tuần tự trong [8] đó là dạng hàm của thông lượng nhiệt cực đại và hệ số hấp thụ không cần biết trước và quá trình thiết lập thông lượng nhiệt cực đại được thực hiện từng bước thời gian cho đến thời điểm kết thúc khảo sát. Hơn nữa, việc sử dụng một phương pháp ngược hiệu quả như phương pháp tuần tự trong việc thiết lập thông lượng nhiệt cực đại tia laser và kích thước mối hàn trong hàn điểm bằng laser bằng mô hình 2D chưa được thực hiện. Do vậy, nghiên cứu này sẽ thực hiện thiết lập thông lượng nhiệt cực đại và kích thước mối hàn trong hàn điểm bằng laser bằng phương pháp tuần tự.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT



Hình 1. Mô hình hàn điểm

Xem xét một mẫu hàn trụ tròn, bề mặt trên của mẫu hàn được gia nhiệt bởi tia laser có bán kính r_b . Các mặt còn lại của mẫu hàn được bọc với lớp cách nhiệt để không cho năng lượng nhiệt

thất thoát ra môi trường xung quanh. Một cảm biến nhiệt được đặt bên trong mẫu hàn để lưu sự thay đổi nhiệt độ suốt quá trình gia nhiệt (Hình 1). Do tính đối xứng trục của vật mẫu. Phương trình dẫn nhiệt trong hệ tọa độ trụ 2D được cho như sau [9]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(r \cdot k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho(T) \cdot C(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Với các điều kiện biên tương ứng:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q(r) \text{ tại } \Gamma_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ tại các mặt còn lại} \quad (3)$$

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (4)$$

Trong đó, $k(T)$, $\rho(T)$, $C(T)$ là hệ số dẫn nhiệt, tỷ trọng riêng và nhiệt dung riêng của mẫu hàn (chú ý rằng các hệ số này phụ thuộc vào nhiệt độ); $T(r, z, t)$ là trường nhiệt độ trong mẫu hàn; T_0 là nhiệt độ ban đầu; và $q(r)$ là thông lượng nhiệt của tia laser tại khoảng cách r với góc tại tâm của nguồn nhiệt. Trong trường hợp này, mô hình nguồn nhiệt được đề xuất bởi Friedman [10]. Khi đó, mô hình nguồn nhiệt có thể viết lại cho tia laser bán kính r_b như sau:

$$q(r) = \frac{3P \cdot \eta}{\pi r_b^2} \exp\left(\frac{-3r^2}{r_b^2}\right) \quad (5)$$

Trong đó, P là công suất của tia laser; η là thông lượng nhiệt cực đại. Khi $r = 0$, phương trình (5) trở thành:

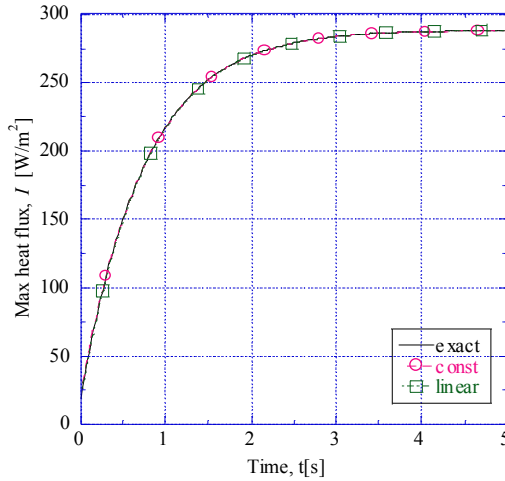
$$q(r) = I = \frac{3P \cdot \eta}{\pi r_b^2} \quad (6)$$

Trong đó, I là thông lượng nhiệt cực đại. Khi thông lượng nhiệt cực đại, đặc tính nhiệt của vật mẫu, điều kiện biên và cấu hình hàn điểm được biết, trường nhiệt độ $T(r, z, t)$ trong miền tính toán của vật mẫu có thể đạt được bằng cách giải các phương trình (1-4) bằng FEM kết hợp với phương pháp nhiệt dung riêng hiệu quả để xem xét sự thay đổi pha.

Ngược lại, khi thông lượng nhiệt cực đại tia laser trong quá trình hàn điểm này chưa biết, chúng ta sử dụng giá trị nhiệt đo được từ cảm biến được nhúng tại điểm $K(o, z)$ kết hợp với phương pháp tuần tự [8] để thiết lập ngược thông số này. Hơn nữa, chúng ta cũng có thể xác định được kích thước của mối hàn trong quá trình thiết lập thông lượng nhiệt này.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, phương pháp tuần tự được sử dụng. Phương pháp này gồm bốn vấn đề: vấn đề thuận, vấn đề độ nhạy, vòng lặp Newton Raphson và điều kiện dừng. Chi tiết thuật toán được trình bày trong nghiên cứu [8].



Hình 2. Kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại với $\sigma = 0$ với $r = 2$

Trong phần này, một trường hợp tổng quát được đưa ra để chứng minh cho phương pháp đề xuất trong đề tài này để thiết lập ngược thông lượng nhiệt cực đại trong hàn điểm laser.

Trong đó, một mẫu hàn trụ tròn có chiều cao là $H = 5\text{mm}$ và đường kính là $d = 20\text{mm}$ được sử dụng. Vật liệu sử dụng là inox thương mại AISI304 có được tính chất nhiệt phụ thuộc vào nhiệt độ, lấy từ nghiên cứu của Sabarikanth [11]. Một cảm biến nhiệt giả định được nhúng tại vị trí $K(0, -1\text{mm})$. Nghĩa là dữ liệu nhiệt độ đo lường được tạo ra bằng cách trích xuất dữ liệu tại vị trí K từ lời giải của bài toán thuận với thông lượng nhiệt cực đại biết trước. Sau đó để tạo ra dữ liệu bao gồm sai số giống như việc đo đạc thực tế hay trong phòng thí nghiệm, người ta sử dụng công thức sau:

$$T^m = T^c + \lambda \sigma \quad (7)$$

Trong đó, T^m là dữ liệu nhiệt độ đo lường, giá trị này được tạo từ giá trị nhiệt đo tính toán bởi bài toán thuận, T^c cộng với một lượng sai số $\lambda \sigma$, với σ là sai số chuẩn và λ là con số ngẫu nhiên nằm trong khoảng $-2,576 \leq \lambda \leq 2,756$, mang ý nghĩa 99% khoảng rõ ràng trong sự xuất hiện của sai số [12]. Giá trị của λ được sử dụng từ thư viện của DRNNOR [13] nhằm mô phỏng đúng với qui luật xác suất mà sai số xuất hiện trong các kết quả đo thực tế.

Bên cạnh đó, để điều tra độ lệch giữa kết quả thiết lập và kết quả chính xác, công thức tính sai số trung bình tương đối (relative average error) giữa kết quả chính xác và thiết lập được cho như sau:

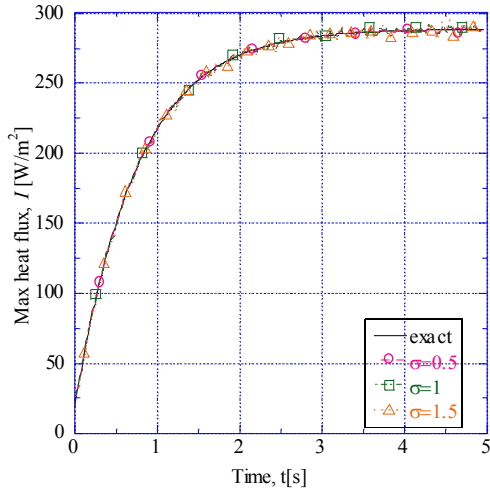
$$\mu = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \left| \frac{f - \hat{f}}{\hat{f}} \right| \quad (8)$$

Trong đó, f là giá trị thiết lập của thông lượng nhiệt cực đại có dữ liệu nhiệt độ có sai số; \hat{f} là giá trị chính xác của thông lượng nhiệt cực đại. N_t là số bước thời gian. Phương trình (9) cho ta biết rằng giá trị μ còn nhỏ thì kết quả thiết lập còn chính xác.

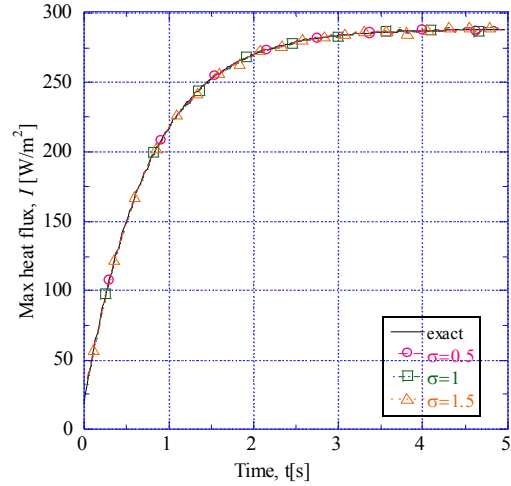
Mẫu hàn ban đầu có nhiệt độ bằng nhiệt độ môi trường ($T_0 = 27^\circ\text{C}$) được gia nhiệt bằng tia laser có bán kính hiệu quả (effective radius) là $r_b = 0,63\text{mm}$ với thời gian gia nhiệt là $t_f = 5\text{s}$. Thông lượng nhiệt cực đại được giả sử là một hàm số mũ theo thời gian gia nhiệt (đây là quan hệ thường gặp trong thực tế của thông lượng nhiệt cực đại) như sau:

$$\eta(t) = 288,71(1 - 6,5 \times 10^{-1} \times \exp(-(t-2)/0,75)) \quad (9)$$

Kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại được thể hiện ở Hình 2. Như được thể hiện, giá trị hấp thu được thiết lập có kết quả xấp xỉ rất tốt với giá trị chính xác trong trường hợp không có sai số ($\sigma = 0$).



Hình 3. Kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại với $\sigma \neq 0$ với $r = 2$



Hình 4. Kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại với $\sigma \neq 0$ với $r = 4$

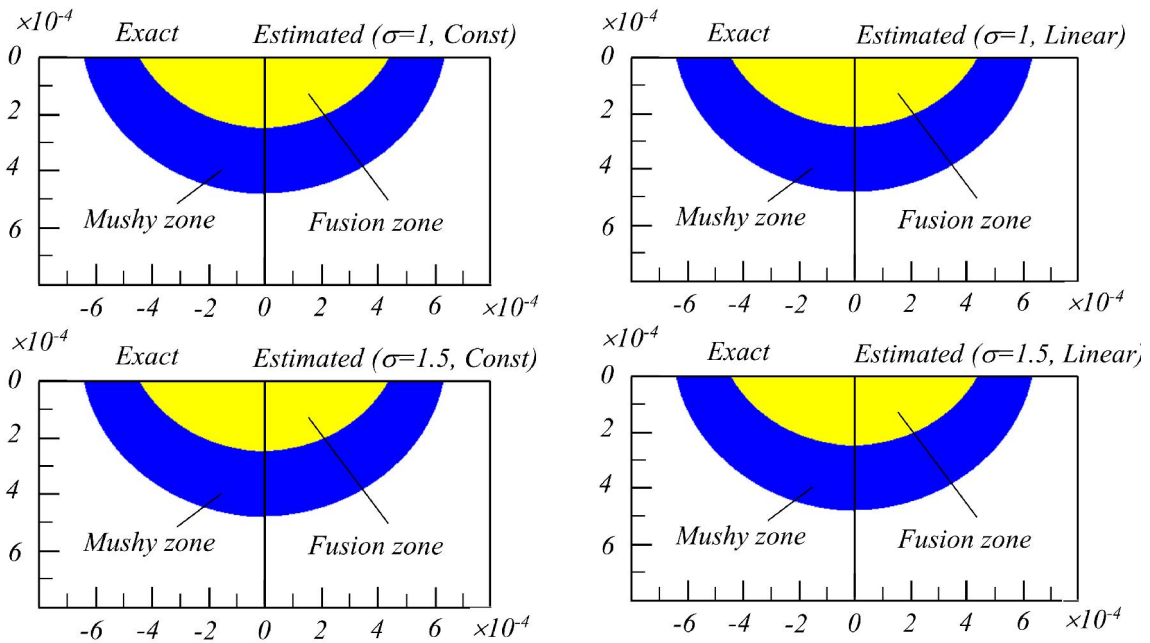
Hình 3 và Hình 4 mô tả kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại trong trường hợp có sai số đo lường với trường hợp mỗi quan hệ tuyến tính của bước thời gian tương lai với $r = 2$ và $r = 4$. Một cách tổng thể, ta thấy rằng kết quả thiết lập được xấp xỉ rất tốt trong trường hợp sai số đo lường được xem xét. Sai số tương đối trung bình trong trường hợp 2 cũng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Sai số tương đối trung bình trong với $\sigma \neq 0$

| Trường hợp | Bước thời gian tương lai | |
|----------------|--------------------------|---------|
| | $r = 2$ | $r = 4$ |
| Hằng số | | |
| $\sigma = 0,5$ | 0,0042 | 0,0061 |
| $\sigma = 1$ | 0,0065 | 0,0072 |
| $\sigma = 1,5$ | 0,0089 | 0,0094 |
| Tuyến tính | | |
| $\sigma = 0,5$ | 0,0071 | 0,0121 |
| $\sigma = 1$ | 0,0102 | 0,0134 |
| $\sigma = 1,5$ | 0,0133 | 0,0148 |

Bảng 2. Chiều rộng và chiều sâu mỗi hàn tại $t = 5s$

| Trường hợp | Chiều rộng (mm) | Chiều sâu (mm) |
|--------------------------|-----------------|----------------|
| $\sigma = 0$ | 0,4425 | 0,2375 |
| $\sigma = 1$ (H. số) | 0,4418 | 0,2366 |
| $\sigma = 1$ (T. tính) | 0,4419 | 0,2368 |
| $\sigma = 1,5$ (H. số) | 0,4415 | 0,2364 |
| $\sigma = 1,5$ (T. tính) | 0,4416 | 0,2365 |



Hình 5. Kích thước mỗi hàn giữa thiết lập và chính xác

Từ Bảng 2, giá trị sai số tương đối trung bình với các trường hợp khác nhau của sai số chuẩn σ , và bước thời gian tương lai, r cũng nhỏ. Chú ý rằng, giá trị sai số tương đối trung bình không giảm khi số bước thời gian tương lai, r , tăng. Hiện tượng này được gọi là “sai số chỉ dẫn - leading error” như được trình bày bởi Lin [14, 15]. Hiện tượng này xảy ra trong kết quả này là do sự giả sử “tạm thời” của bước thời gian tương lai là hằng số và tuyến tính. Giả sử tạm thời này không trùng với dạng hàm thực tế của hàm thông lượng nhiệt cực đại. Do vậy, việc tăng số bước thời gian tương lai sẽ dẫn đến sai số lớn trong quá trình thiết lập ngược. Tuy nhiên, giá trị lớn của r sẽ tăng tính ổn định của quá trình thiết lập khi sai số đo lường lớn. Theo kinh nghiệm bản thân, để có giá trị r tối ưu trong quá trình trình thiết lập, ta cần sử dụng vài giá trị của r , sau đó so sánh kết quả và chọn giá trị tối ưu.

Trong quá trình thiết lập thông lượng nhiệt cực đại, chúng ta cũng dễ dàng tiên đoán được kích thước của mỗi hàn, gồm vùng chuyển pha (mushy zone), vùng chảy hàn (fusion zone). Các kích thước này ở bước thời gian cuối cùng ($t_f = 5s$) đối với một số trường hợp của $\sigma = 1, r = 2$ và $\sigma = 1,2, r = 2$ được thể hiện trong Hình 5.

Hơn nữa, chiều rộng và chiều sâu của mỗi hàn đối với trường hợp $\sigma = 1, r = 2$ và $\sigma = 1,5, r = 2$ được thể hiện trong Bảng 2 và phần trăm sai số của các giá trị này (giữa giá trị thiết lập và giá trị chính xác) được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Sai số chiều rộng và chiều sâu mỗi hàn tại $t = 5s$

| Trường hợp | Chiều rộng (%) | Chiều sâu (%) |
|--------------------------|----------------|---------------|
| Sai số (%) | | |
| $\sigma = 1$ (H. số) | 0,158 | 0,379 |
| $\sigma = 1$ (T. tính) | 0,136 | 0,295 |
| $\sigma = 1,5$ (H. số) | 0,23 | 0,46 |
| $\sigma = 1,5$ (T. tính) | 0,2 | 0,42 |

Từ các kết quả trong Bảng 2 và Bảng 3, có thể nói rằng kết quả tiên đoán của kích thước mỗi hàn có một sự xấp xỉ rất tốt với giá trị chính xác trong tất cả trường hợp có sai số đo lường. Bảng cho ta thấy rằng độ lệch phần trăm của chiều rộng và chiều sâu mỗi hàn giữa kết quả tiên đoán và kết quả chính xác là rất nhỏ. Cụ thể, sai số lớn nhất là 0.23% đối với chiều rộng mỗi hàn và 0.46% đối với chiều sâu mỗi hàn đối với trường hợp sai số đo lường với độ lệch chuẩn là $\sigma = 1,5$ và với quan hệ hằng số của bước thời gian tương lai. Điều này cũng ngụ ý rằng ảnh hưởng của sai số đo lường và số bước thời gian tương lai trong việc tiên đoán kích thước mỗi hàn là rất nhỏ.

Từ những kết quả được trình bày trong hai trường hợp trên, có thể nói rằng việc thiết lập thông lượng nhiệt cực đại trong hàn điểm bằng phương pháp tuần tự đạt kết quả rất tốt. Hơn nữa, dựa trên kết quả thiết lập của thông lượng nhiệt cực đại, kích thước mỗi hàn cũng được tiên đoán một cách chính xác.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã thực hiện thiết lập thông lượng nhiệt cực đại và kích thước mỗi hàn điểm bằng laser. Để thực hiện điều này, phương pháp tuần tự được sử dụng. Điểm thuận lợi của phương pháp đề xuất đó là dạng hàm của thông lượng nhiệt cực đại không cần biết trước và quá trình thiết lập thông lượng nhiệt cực đại được thực hiện từng bước thời gian cho đến thời điểm kết thúc khảo sát. Một trường hợp tổng quát với thông lượng nhiệt cực đại là một hàm số mũ theo thời gian gia nhiệt. Từ những kết quả thực hiện, kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại bằng phương pháp ngược có một sự xấp xỉ rất tốt so với giá trị chính xác. Dựa trên kết quả thiết lập thông lượng nhiệt cực đại, kích thước mỗi hàn (chiều rộng và chiều sâu mỗi hàn) cũng được tiên đoán chính xác.

Có thể kết luận rằng, thông lượng nhiệt cực đại trong hàn điểm bằng laser có thể xác lập ngược một cách chính xác bằng phương pháp tuần tự. Kết quả này có thể sử dụng cho các hình thức hàn khác như hàn đường (line welding), hàn đoạn (segment welding)... bằng tia laser.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W.M. Steen, J. Mazumder, Laser Material Processing, Springer, (2010).
- [2]. E.K.-A. Jr., Principles of laser materials processing, Wiley, 2009.
- [3]. P. Dinesh Babu, G. Buvanashakaran, K.R. Balasubramanian, Experimental investigation of laser transformation hardening of low alloy steel using response surface methodology, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(5-8) (2013) 1883-1897.
- [4]. K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile, Journal of Materials Processing Technology, 164-165 (2005) 978-985.
- [5]. Y.S. Sun, C.I. Weng, T.-C. Chen, W.-L. Li, Estimation of Surface Absorptivity and Surface Temperature in Laser Surface Hardening Process, Japanese Journal of Applied Physics, 35(6R) (1996) 3658.

- [6]. J.-T. Wang, C.I. Weng, J.G. Chang, C.C. Hwang, The influence of temperature and surface conditions on surface absorptivity in laser surface treatment, *J Appl Phys*, 87(7) (2000) 3245-3253.
- [7]. H.T. Chen, X.Y. Wu, Estimation of surface absorptivity in laser surface heating process with experimental data, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(6) (2006) 1141.
- [8]. Q. Nguyen, C.-y. Yang, A modified Newton–Raphson method to estimate the temperature-dependent absorption coefficient in laser welding process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102 (2016) 1222-1229.
- [9]. A. De, S.K. Maiti, C.A. Walsh, H.K.D.H. Bhadeshia, Finite element simulation of laser spot welding, *Sci Technol Weld Joi*, 8(5) (2003) 377-384.
- [10]. E. Friedman, Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 97(3) (1975) 206-213.
- [11]. R. Sabarikanth, K. Sankaranarayanan, N. Siva Shanmugam, G. Buvanashakaran, A study of laser welding modes with varying beam energy levels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(5) (2009) 1141-1156.
- [12]. M.N. Ozisik, *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*, (2000).
- [13]. IMSL, Library Edition 10.0, *User's Manual: Math Library Version 1.0*, Houston, Tex, (1987).
- [14]. S.-M. Lin, C.o.-K. Chen, Y.-T. Yang, A modified sequential approach for solving inverse heat conduction problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12-13) (2004) 2669-2680.
- [15]. S.-M. Lin, A sequential algorithm and error sensitivity analysis for the inverse heat conduction problems with multiple heat sources, *Applied Mathematical Modelling*, 35(6) (2011) 2607-2617.