

Khảo sát ảnh hưởng của công nghệ tôi laser tới độ cứng và cấu trúc tế vi của thép P18

Nguyễn Văn Thành*, Nguyễn Thành Hợp, Nguyễn Duy Dân

Viện Ứng dụng Công nghệ, 25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 18/7/2023; ngày chuyển phản biện 21/7/2023; ngày nhận phản biện 7/8/2023; ngày chấp nhận đăng 10/8/2023

Tóm tắt:

Bài báo giới thiệu công nghệ tôi laser và trình bày kết quả khảo sát độ cứng, cấu trúc tế vi của mẫu thép P18 sau khi tôi laser. Công nghệ tôi laser có ưu điểm chính xác, hạn chế cong vênh, tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường so với các công nghệ tôi truyền thống. Mẫu thép P18 có kích thước Ø22x20 mm được mài qua các giấy nhám #240, 400, 600, 1000 và 1200 trước khi tôi (truyền thống và laser). Nghiên cứu ảnh hưởng của công suất nguồn tôi laser và công nghệ tôi truyền thống (nung nóng thép trong lò điện trở và làm nguội trong dầu) đến độ cứng và tổ chức tế vi của thép P18. Tổ chức tế vi và độ cứng tế vi của mẫu lần lượt được xác định bằng kính hiển vi quang học Axiovert 40 MAT và máy đo độ cứng tế vi FM-700e. Độ cứng mẫu sau tôi với công suất nguồn laser 300, 500, 700 và 900 W tương ứng lần lượt là 280, 450, 940 và 1050 HV_{0,1}, độ cứng mẫu tôi truyền thống là 650 HV_{0,1}. Từ ảnh hiển vi quang học mẫu thép sau tôi laser, quan sát thấy vùng sáng màu và tối màu lần lượt tương ứng với vùng có độ cứng cao và vùng chuyển tiếp có độ cứng thấp hơn trong kết quả đo độ cứng tế vi.

Từ khóa: nhiệt luyện, thép P18, tôi laser, xử lý bề mặt.

Chỉ số phân loại: 2.5

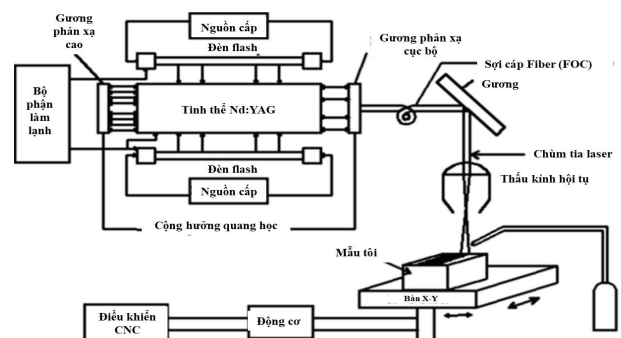
1. Đặt vấn đề

Trong quá trình sản xuất cơ khí, nhiệt luyện thường là khâu cuối cùng và quyết định đến chất lượng sản phẩm. Quá trình nhiệt luyện được thực hiện bằng cách nung nóng chi tiết đến nhiệt độ chuyển biến thành phần pha của thép, sau đó làm nguội nhanh trong môi trường phù hợp (nước, dầu, khí nén...) [1]. Sau quá trình nhiệt luyện, cấu trúc của thép thay đổi so với cấu trúc ban đầu, dẫn tới cơ tính (độ cứng, bền...) của thép được nâng cao. Công nghệ nhiệt luyện truyền thống như tôi nước, tôi dầu, khí nén... có những hạn chế như: có thể gây cong vênh, sai lệch kích thước, thời gian quá trình kéo dài [2].

Trong lĩnh vực xử lý bề mặt, laser đã được ứng dụng trong công nghệ tôi laser [3]. Chùm tia laser có năng lượng cao được quét trên bề mặt chi tiết, nung nóng bề mặt chi tiết đến nhiệt độ trên nhiệt độ austenit hóa, khi tia laser đi qua, bề mặt chi tiết xảy ra quá trình giảm nhiệt do truyền nhiệt vào thể tích vật tôi (còn gọi là tự tôi), kết quả dẫn đến hình thành tổ chức mactenxit với độ cứng cao [3]. Công nghệ tôi laser được nghiên cứu và ứng dụng lần đầu từ những năm 1970 [4].

Nguồn laser khí CO₂ với công suất 2-5 kW được ứng dụng đầu tiên để tôi laser cho thép, với hệ số hấp thụ năng lượng tia laser đạt tới 60-70%. Năm 2004, laser diode năng lượng cao đã được ứng dụng để tôi thép [4-7]. Ngoài thép và gang thì tôi laser đang được nghiên cứu ứng dụng cho nhiều loại vật liệu khác. Sơ đồ cấu trúc một hệ thống tôi laser được thể hiện ở hình 1.

*Tác giả liên hệ: Email: thanhmaterial@gmail.com



Hình 1. Mô hình tôi laser [2].

Trong công nghệ tôi truyền thống, cả khối chi tiết được nung nóng trong lò rồi làm nguội trong nước, trong dầu, khí nén... Ngược lại, công nghệ tôi laser cho phép lựa chọn chính xác vùng cần tôi, ví dụ chân răng trong bánh răng, phần lưỡi của mũi dao tiện... Do đó, công nghệ nhiệt luyện mới này giúp tiết kiệm thời gian và năng lượng, không gây cong vênh chi tiết sau tôi và là công nghệ thân thiện với môi trường.

Để tôi được thép, chùm tia laser cần phải nâng nhiệt của vùng thép tới nhiệt độ austenit hóa, đây là nhiệt độ xảy ra chuyển biến pha ferrit thành austenit của thép. Hàm biến đổi nhiệt độ trong quá trình nung nóng bởi chùm laser được thể hiện trong công thức sau:

$$T(r, z, \tau) = \frac{2P_{abs}}{\rho C \sqrt{4\pi a \tau}} \int_0^\tau \frac{1}{(\tau + \tau_f) \sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a\tau} - \frac{r^2}{4a(\tau + \tau_f)}\right) d\tau \quad (1)$$

trong đó: $T(r, z, \tau)$ là hàm của nhiệt độ theo bán kính vùng nung nóng r và chiều sâu vùng tương tác z , nung nóng trong khoảng thời gian τ ; P_{abs} là công suất của tia hấp thụ; τ_f là thời gian cần

Investigating the effects of the laser quenching technology on the hardness and microstructure of P18 steel

Van Thanh Nguyen*, Thanh Hop Nguyen, Duy Dan Nguyen

National Center for Technological Progress,
25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

Received 18 July 2023; revised 7 August 2023; accepted 10 August 2023

Abstract:

The article introduces laser quenching technology and presents the results of surveying the hardness and microstructure of P18 steel sample after laser quenching. Laser quenching is a new candidate technique for having precise heat treatment, limiting warping, saving energy, and being environmentally friendly compared to traditional quenching. Before quenching samples (laser quenching or normal quenching), the $\phi 22$ mm diameter x 20 mm thickness samples were sequentially ground by abrasive papers with a grit size of #240, 400, 600, 1000, and 1200. This study aimed to investigate the influence of laser quenching power and traditional quenching on the hardness and microstructure of P18 steel... The microstructure and microhardness were observed by the Axiovert 40 MAT optical microscope and the Future Tech Corp FM-700e hardness tester, respectively. The results showed that the quenched sample hardness with a laser source power of 300, 500, 700, and 900 W are 280, 450, 940, and 1050 HV_{0.1}, respectively, and compared to the traditional harden, it only reaches 650 HV_{0.1}. Observation of the microstructure of the laser-hardened sample in cross-section, including a bright white high-hardness region and a dark transition region.

Keywords: heat treatment, laser quenching, P18 steel, surface treatment.

Classification number: 2.5

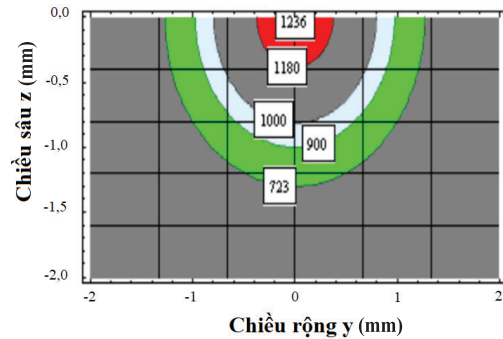
thiết để nhiệt truyền đến khoảng các r_f ($\tau_f = r_f^2/4a$); r_f là khoảng cách từ chùm tia từ công suất giảm xuống $1/e^2$ của giá trị lớn nhất trục chùm tia; z là tọa độ vuông góc với bề mặt vật liệu theo hướng nung nóng; r là bán kính tọa độ, vuông góc với tọa độ z ; c là nhiệt dung riêng của vật liệu; ρ là khối lượng riêng của vật liệu; a là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu.

Trong thực tế tôi laser, quá trình nung nóng bằng một chùm tia cố định là hiếm gặp. Thông thường chùm tia laser hoặc bề mặt vật liệu được dịch chuyển với một vận tốc v cho trước. Trong trường hợp này nhiệt độ nung nóng được mô tả bằng phương trình phân bố nhiệt độ trong mặt phẳng, dọc theo trục x , đúng với phân bố Gaussian của mật độ công suất của chùm tia:

$$T(x, z, \tau) = T_0 + \frac{P_{abs}}{2\pi\lambda v[\tau(\tau + \tau_f)]^{1/2}} \exp\left\{-\left[\frac{(z - z_0)^2}{4a\tau} + \frac{x^2}{4a(\tau + \tau_f)}\right]\right\} \quad (2)$$

trong đó: T_0 là nhiệt độ môi trường; λ là hệ số dẫn nhiệt; v là tốc độ di chuyển chùm tia; z là tọa độ cao; z_0 là chiều sâu của nhiệt thâm nhập vào vật liệu trong quá trình chùm tia laser hoạt động trong thời gian $\tau = r_f/v$; x là tọa độ vuông góc với tọa độ z , phù hợp với hướng di chuyển của chùm tia.

Trong quá trình tôi thép, nhiệt độ là thông số công nghệ quan trọng nhất ảnh hưởng tới cấu trúc và tính chất của thép sau tôi. Thứ nhất, để tôi được thép thì cần nung thép đến nhiệt độ austenit hóa, đây là nhiệt độ xảy ra chuyển biến pha ferrit thành austenit. Thứ hai, tốc độ làm nguội phải đủ lớn để pha ferrit chuyển thành mactenxit. Do đó, tùy vào điều kiện tôi laser mà cấu trúc vùng được tôi có thể xuất hiện thành phần pha khác nhau. Dưới tác dụng của nhiệt độ do chùm laser cung cấp, quá trình nung nóng cục bộ và tôi thép cục bộ xảy ra. Thông số được sử dụng để điều khiển quá trình tôi laser chính gồm có công suất nguồn P_{abs} và tốc độ di chuyển của chùm tia v . Phân bố nhiệt độ trong vùng tôi laser được thể hiện như hình 2.



Hình 2. Phân bố nhiệt độ trong vùng tôi laser theo mặt cắt ngang của mẫu [3].

Mặc dù công nghệ tôi laser đã được ứng dụng rộng rãi tại các nước phát triển, nhưng ở Việt Nam công nghệ này vẫn chưa được ứng dụng vào nghiên cứu và sản xuất. Do đó, cần có những khảo sát và nghiên cứu để đưa công nghệ này vào sản xuất.

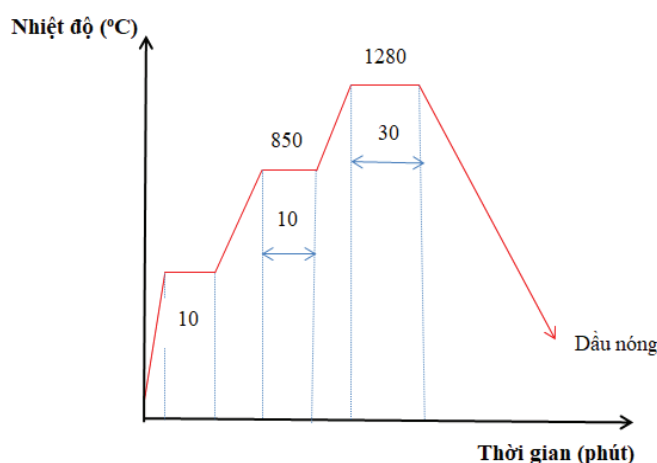
2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng

Thanh thép P18 có kích thước $\phi 22 \times 400$ mm ban đầu được cắt thành các mẫu thép có kích thước $\phi 22 \times 20$ mm. Mẫu thép trước khi tôi laser được phân tích thành phần quang phổ phát xạ ARL3460 để kiểm tra thành phần mác thép. Mẫu được mài lần lượt qua các giấy nhám #240, 400, 600, 1000 và 1200 trước khi tôi (truyền thống và laser). Ký hiệu mẫu thép ở trạng thái cung cấp là CC.

2.2. Thực nghiệm tôi mẫu

Tôi thử nghiệm mẫu thép trong lò nung điện trở có khí bảo vệ theo quy trình ở hình 3.



Hình 3. Quy trình tôi thép P18.

Ký hiệu mẫu thép tôi truyền thống như quy trình ở hình 3 là TT.

Sử dụng thiết bị laser fiber Model AKW-F1000W/CAS với công suất tối đa 8000 W với chế độ liên tục. Sử dụng công suất 300, 500, 700 và 900 W để tôi mẫu với khoảng cách cố định từ mẫu đến đầu tôi laser là 300 mm, thời gian tôi 120 giây. Ký hiệu mẫu tôi laser tương ứng với công suất 300, 500, 700 và 900 W lần lượt là LS0,3, LS0,5, LS0,7 và LS0,9.

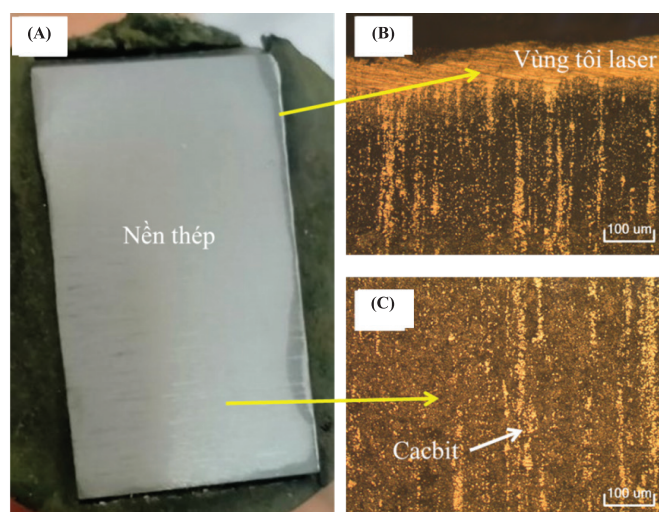
2.3. Đo đạc và phân tích mẫu trước và sau tôi

Thành phần mác thép mẫu được phân tích bằng máy quang phổ phát xạ ARL 3460 của Viện Công nghệ, Bộ Công Thương. Độ cứng bề mặt mẫu trước và sau tôi được đo bằng máy FM-700e với thang đo $HV_{0,1}$ (Vicker), tải trọng 100 g. Mẫu sau tôi laser được mài và đánh bóng theo mặt cắt ngang, sử dụng kính hiển vi quang học Axiovert 40 MAT để xác định cấu trúc tế vi vùng mẫu tôi laser. Ngoài ra, nghiên cứu cũng sử dụng máy đo độ cứng HRC (Hardness rockwell C) và các thiết bị phụ trợ để thực hiện quá trình gia công mẫu khác.

3. Kết quả và bàn luận

Mẫu nghiên cứu có thành phần phần trăm nguyên tố chính lần lượt là 0,81C, 4,05Cr, 0,34Si, 0,30Mn, 18,02W, 0,72Mo, 1,02V-Fe (còn lại). Kết quả cho thấy, mẫu thép sử dụng có thành phần tương đương với mác thép P18 theo tiêu chuẩn Nga GOST19265-73.

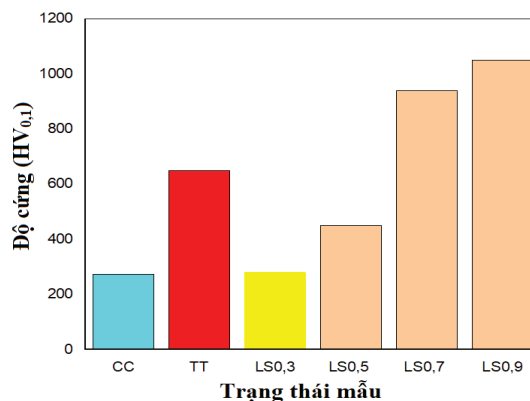
Hình 4 thể hiện mặt cắt ngang mẫu sau tôi laser (4A), gồm vùng vật liệu đã được tôi (4B) và nền thép chưa được tôi (4C). Quan sát bằng mắt thường có thể thấy, vùng tôi laser gồm hai vùng, ngoài bề mặt là vùng sáng màu có độ cứng cao và vùng chuyển tiếp tối màu có độ cứng thấp hơn. Trong khi đó, nền thép chưa tôi gồm cacbit hợp kim và nền ferrit.



Hình 4. Hình ảnh mẫu tôi laser thép P18 với công suất 0,7 kW (LS0,7), thời gian tương tác giữa chùm laser và bề mặt mẫu 120 giây. (A) Mặt cắt ngang mẫu; (B) Vùng mẫu ngoài cùng tôi laser; (C) Nền thép ban đầu.

So sánh cấu trúc mẫu tôi laser và tôi truyền thống có thể thấy tổ chức mẫu tôi truyền thống đồng nhất từ bề mặt vào lõi. Nguyên nhân trong công nghệ tôi truyền thống toàn bộ thể tích mẫu được nung nóng và làm nguội. Trong khi đó, trong công nghệ tôi laser chỉ một vùng vật liệu sát bề mặt được nung nóng và xảy ra chuyển biến sau tôi. Trong quá trình làm việc chỉ có bề mặt yêu cầu độ cứng cao để có khả năng chống mài mòn. Vì vậy, công nghệ tôi laser có ưu điểm đạt mục đích nâng cao độ cứng bề mặt, thời gian tôi ngắn (120 giây so với 2,5-3 giờ trong tôi truyền thống).

Tùy vào thành phần mác thép và chế độ tôi mà cấu trúc pha của mẫu thép sau tôi sẽ có sự thay đổi. Sự thay đổi thành phần pha dẫn tới thay đổi tính chất của vật liệu là độ cứng. Cụ thể, thép ở trạng thái ban đầu mềm (độ cứng thấp) do đặc tính của pha ferrit. Sau quá trình tôi, thép có độ cứng cao do pha mactenxit có độ cứng cao. Khác với công nghệ tôi truyền thống sử dụng thang đo độ cứng HRC để đo thì thang đo $HV_{0,1}$ thường được sử dụng để xác định thay đổi độ cứng này. Ảnh hưởng công suất nguồn tới độ cứng bề mặt mẫu sau tôi được thể hiện ở hình 5.

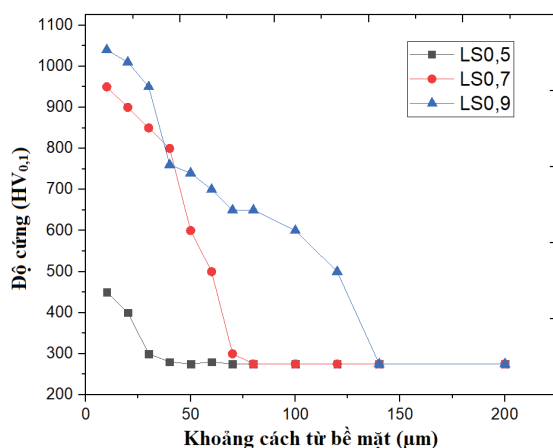


Hình 5. So sánh độ cứng mẫu trước tôi (CC), sau tôi truyền thống (TT) và mẫu tôi laser với công suất khác nhau.

Kết quả đo độ cứng trên bề mặt các mẫu CC ($275 \text{ HV}_{0,1}$), TT ($650 \text{ HV}_{0,1}$), LS0,3 ($280 \text{ HV}_{0,1}$), LS0,5 ($450 \text{ HV}_{0,1}$), LS0,7 ($940 \text{ HV}_{0,1}$) và LS0,9 ($1050 \text{ HV}_{0,1}$) cho thấy, mẫu thép ở trạng thái ban đầu CC có độ cứng thấp gồm nền ferrit và cacbit. Trong quá trình nung nóng và giữ nhiệt ở nhiệt độ austenit hóa, carbon và nguyên tố hợp kim, cacbit hòa tan vào nền austenit (do ferrit chuyển biến thành austenit). Quá trình tôi thành công khi austenit chuyển biến thành pha cứng mactenxit có độ cứng cao. Độ cứng của mẫu thép sau tôi phụ thuộc vào hàm lượng các nguyên tố hợp kim, cacbit đã hòa tan vào nền.

Ảnh hưởng của công suất nguồn tôi laser được thể hiện qua kết quả đo độ cứng bề mặt mẫu LS0,3, LS0,5, LS0,7 và LS0,9. Từ kết quả đo độ cứng có thể thấy duy nhất mẫu LS0,3 không tôi được (không tăng độ cứng so với mẫu CC). Nguyên nhân do công suất nguồn laser không đủ để nung nóng thép đến nhiệt độ chuyển biến austenit hóa T_A (với thép P18 thì $T_A=1280^\circ\text{C}$). Khi nâng công suất nguồn nung P_{abs} theo công thức (1) ở trên nhiệt độ truyền tới bề mặt mẫu thép tăng lên và nung nóng bề mặt thép. Khi tăng công suất lên đến 500 W, nhiệt độ nung bề mặt mẫu bắt đầu đủ để xảy ra quá trình chuyển pha từ nền ferrit thành austenit và sau đó có quá trình tôi austenit thành mactenxit. Kết quả làm tăng độ cứng lên $450 \text{ HV}_{0,1}$ so với độ cứng ban đầu là $275 \text{ HV}_{0,1}$. Tuy nhiên, công suất thấp nên hàm lượng C và nguyên tố hợp kim hòa tan vào nền nhỏ và vùng đạt nhiệt T_A mỏng trên bề mặt. Ngược lại, khi công suất đủ lớn mẫu LS0,7 và LS0,9 đạt độ cứng lên tới 940 và $1050 \text{ HV}_{0,1}$, cao hơn cả mẫu tôi truyền thống TT (chỉ đạt $650 \text{ HV}_{0,1}$). Nguyên nhân là do trong công nghệ tôi truyền thống hàm lượng carbon, nguyên tố hợp kim và cacbit hòa tan vào nền thấp hơn dẫn tới pha mactenxit sau tôi thấp hơn (không hoàn toàn). Một lý do khác là trong công nghệ tôi truyền thống bên cạnh quá trình tạo thành pha mactenxit cứng thì còn austenit dư.

Kết quả đo phân bố độ cứng của các mẫu tôi laser thành công LS0,5, LS0,7 và LS0,9 được thể hiện ở hình 6.



Hình 6. Phân bố độ cứng của các mẫu tôi laser thành công.

Kết quả cho thấy, độ cứng mẫu tôi laser giảm dần từ bề mặt vào trong lõi. Nếu xác định chiều dày lớp vật liệu hóa bền được tính từ bề mặt đến vị trí có độ cứng nền, thì chiều dày lớp hóa bền của các mẫu LS0,5, LS0,7 và LS0,9 lần lượt là 25, 70 và 125 μm. Kết quả phân bố độ cứng phù hợp với phân bố nhiệt độ như mô tả ở hình 2. Việc phân bố nhiệt độ như trên giải thích cho phân bố độ cứng theo mặt cắt ngang. Cụ thể, vùng sáng màu có độ cứng cao, vùng chuyển tiếp tối màu có độ cứng thấp hơn. Vùng vật liệu bên ngoài cùng có tốc độ nguội đủ lớn do đó chuyển biến thành pha mactenxit, vùng sát với nền không kịp chuyển biến do đó có thành phần pha là austenit dư. Giữa hai vùng mactenxit và vùng không chuyển biến austenit là vùng trung gian có sự xuất hiện cả hai pha này [3].

4. Kết luận

Tôi laser là một công nghệ xử lý bề mặt mới đang được nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực trên thế giới. Do đó cần có những nghiên cứu và dự án triển khai ứng dụng mới của laser ở Việt Nam.

Thép P18 tôi thành công trong điều kiện nghiên cứu với công suất tối thiểu 500 W, khoảng cách từ nguồn tới mẫu 300 mm và thời gian tương tác giữa nguồn laser với bề mặt thép P18 trong 120 giây.

Công nghệ tôi laser có khả năng tôi cứng cao hơn công nghệ truyền thống, tuy nhiên cần nghiên cứu khắc phục những nhược điểm gặp phải trong nghiên cứu này như bề mặt mẫu sau tôi bị oxy hóa mạnh, chiều dày lớp tôi còn thấp hơn nhiều so với các công bố trên thế giới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Burakowski (1999), *Surface Engineering of Metals*, CRC Press, pp.135-146.
- [2] P. Dinesh Badu, K.R. Balasubramanian (2011), "Laser surface hardening: A review", *Int. J. Surface Science and Engineering*, **5**(2-3), pp.131-148, DOI: 10.1504/IJSURFSE.2011.041398.
- [3] A. Hussain, A. Farooq, R. Akhter (2010), "Estimation of the hardness for laser surface hardening of plain carbon steel", *Key Engineering Materials*, **442**, pp.164-171, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.442.164.
- [4] T. Hung, H. Shi (2018), "Temperature modeling of AISI 1045 steel during surface hardening processes", *Materials*, **11**(10), DOI: 10.3390/ma11101815.
- [5] L. Qingbin, L. Hong (1999), "Experimental study of the laser quenching of 40CrNiMoA steel", *Journal of Materials Processing Technology*, **88**(1-3), pp.77-82, DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00381-1.
- [6] R. Carrera-Espinoza (2020), "Surface laser quenching as an alternative method for conventional quenching and tempering treatment of 1538 MV steel", *Advances in Materials Science and Engineering*, **2020**, pp.1-9, DOI: 10.1155/2020/7950684.
- [7] B. Wang, Y. Pan, Y. Liu (2020), "Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron", *Journal of Materials Research and Technology*, **9**(4), pp.8163-8171, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.006.