

PHÂN TÍCH XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN VÀ ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ HÀN LASER VÀ IN 3D KIM LOẠI TRONG SẢN XUẤT THÔNG MINH

ANALYSIS OF DEVELOPMENT TRENDS AND APPLICATIONS OF LASER WELDING AND 3D METAL PRINTING TECHNOLOGY IN SMART MANUFACTURING

Trần Ánh Viên

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tavien@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh chuyển đổi sang sản xuất thông minh, hàn laser và in 3D kim loại đang trở thành hai công nghệ then chốt trong chế tạo và phục hồi chi tiết cơ khí. Bài báo trình bày tổng quan nguyên lý, đặc tính kỹ thuật, hiệu quả kinh tế – công nghệ và các ứng dụng thực tiễn của hai công nghệ này. Kết quả phân tích cho thấy hàn laser vượt trội về khả năng tập trung năng lượng, độ chính xác, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ và chất lượng mối hàn cao; phù hợp với các ngành yêu cầu độ ổn định lớn như khuôn mẫu, năng lượng và hàng không. Trong khi đó, in 3D kim loại (PBF/SLM/DED) cho phép chế tạo các biên dạng phức tạp, tối ưu cấu trúc và rút ngắn đáng kể thời gian nghiên cứu và phát triển (R&D). Bài báo cũng phân tích cơ hội và thách thức khi triển khai tại Việt Nam, đồng thời đề xuất định hướng phát triển trong giai đoạn tới.

Từ khóa: Hàn laser; In 3D kim loại; Sản xuất thông minh; Công nghệ chế tạo tiên tiến.

ABSTRACT

In the context of transitioning toward smart manufacturing, laser welding and metal 3D printing are becoming two key technologies for the fabrication and restoration of mechanical components. This paper provides an overview of their operating principles, technical characteristics, techno-economic efficiency, and practical applications. The analysis shows that laser welding offers outstanding advantages in energy concentration, precision, minimal heat-affected zones, and high weld quality, making it suitable for sectors that demand high stability such as mold manufacturing, energy systems, and aerospace. Meanwhile, metal 3D printing technologies (PBF/SLM/DED) enable the production of complex geometries, structural optimization, and a significant reduction in research and development (R&D) time. The paper also examines the opportunities and challenges of implementing these technologies in Vietnam and proposes development directions for the coming period.

Keywords: Laser welding; 3D metal printing; Smart manufacturing; Advanced manufacturing technology.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư, các công nghệ chế tạo tiên tiến đang được quan tâm và ứng dụng ngày càng rộng rãi nhằm đáp ứng yêu cầu sản xuất thông minh, tiết kiệm năng lượng và nâng cao chất lượng sản phẩm. Trong số đó, công nghệ hàn laser và in 3D kim loại nổi lên như hai giải pháp then chốt trong lĩnh vực cơ khí chế tạo và phục hồi chi tiết.

Hàn laser, với các biến thể như laser cladding, laser cầm tay hay laser xung, có khả năng tạo ra mối hàn chất lượng cao, độ chính xác lớn, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ, từ đó tăng tuổi thọ và giảm chi phí bảo trì thiết bị [1], [2]. Công nghệ này đã được ứng dụng rộng rãi trong các ngành hàng không, năng lượng, dầu khí và chế tạo khuôn mẫu [3].

Song song với công nghệ hàn laser, in 3D kim loại (Additive Manufacturing) cho phép chế tạo các chi tiết phức tạp mà phương pháp gia công truyền thống khó thực hiện, đồng thời tiết kiệm vật liệu và rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm [4]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy in 3D kim loại đặc biệt hữu ích trong sản xuất tùy biến, y tế, hàng không và công nghiệp quốc phòng [5], [6].

Tuy nhiên, cả hai công nghệ này đều đặt ra những thách thức trong thực tiễn, bao gồm chi phí đầu tư ban đầu cao, yêu cầu về vật liệu chuyên dụng, cũng như nguồn nhân lực có trình độ kỹ thuật cao [7], [8]. Đối với Việt Nam, việc nghiên cứu, phân tích và tổng hợp kinh nghiệm quốc tế để đề xuất hướng ứng dụng phù hợp trong sản xuất thông minh là hết sức cần thiết [9], [10].

Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung phân tích xu hướng phát triển, hiệu quả kỹ thuật

và kinh tế, cũng như triển vọng ứng dụng công nghệ hàn laser và in 3D kim loại trong bối cảnh công nghiệp 4.0. Qua đó, bài báo hướng tới việc cung cấp cơ sở khoa học cho định hướng ứng dụng tại Việt Nam trong giai đoạn tới.

2. NỘI DUNG VÀ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

2.1. Công nghệ hàn laser tiên tiến

Hàn laser là phương pháp liên kết kim loại sử dụng mật độ năng lượng cao, cho phép tạo ra mối hàn có độ xuyên sâu lớn, vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) nhỏ và độ ổn định hình học vượt trội so với hàn hồ quang truyền thống. Bản chất của quá trình hàn laser phụ thuộc mạnh vào mật độ công suất q , được xác định theo [1], [2]:

$$q = \frac{P}{\pi r^2}$$

Với P là công suất chùm laser và r là bán kính tiêu điểm. Khi sử dụng laser fiber 1-3 kW với đường kính tiêu điểm 80-200 μm , mật độ công suất có thể đạt 10^6 - 10^7 W/cm², đủ để tạo cơ chế keyhole cho độ ngấu sâu và hẹp [1], [3].

Độ sâu ngấu có thể được mô tả theo quan hệ gần đúng:

$$d = k \frac{P}{v}$$

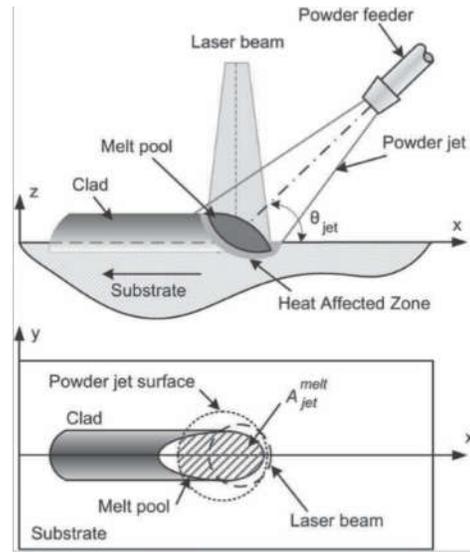
Với v là tốc độ hàn và k là hệ số phụ thuộc vật liệu [2]. Với thép C45, khi tăng công suất laser từ 1,5 kW lên 3 kW và giữ tốc độ hàn 10-12 mm/s, độ sâu ngấu tăng từ 1,2 mm lên gần 3 mm, chứng tỏ khả năng tập trung năng lượng rất cao [2], [3].

Các dạng công nghệ hàn laser được ứng dụng rộng rãi gồm:



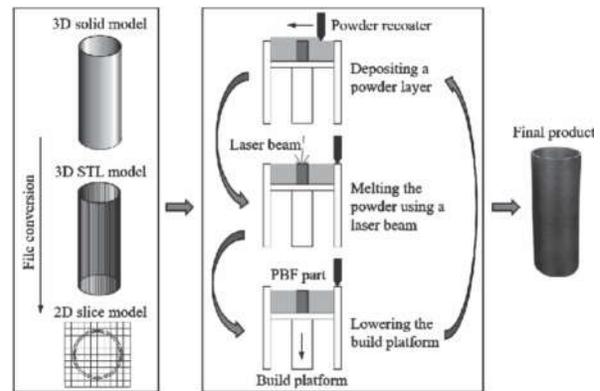
- Laser fiber: Hiệu suất cao, thích hợp cho thép hợp kim và thép không gỉ.
- Laser Nd/YAG xung: Phù hợp sửa chữa chi tiết chính xác.
- Laser CO₂: Hiệu quả khi hàn vật liệu có độ phản xạ lớn, nhưng hiệu suất kém hơn laser fiber [3].

Một hướng phát triển quan trọng là laser cladding, sử dụng bột hợp kim Ni/Co/Fe kết hợp chùm laser công suất 2-6 kW để tạo lớp phủ cứng, độ pha loãng thấp (<5%) và độ cứng sau phủ có thể đạt 50-60 HRC [7]. Phương pháp này được ứng dụng mạnh trong phục hồi trục bơm, bánh răng, khuôn mẫu và chi tiết turbine (Hình 1).



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý laser cladding [1].

Ngoài ra, hàn laser cầm tay đang được sử dụng phổ biến trong các cơ sở sản xuất vừa và nhỏ nhờ ưu điểm tốc độ hàn cao (30-50 mm/s), HAZ nhỏ (0,2-0,4 mm) và chất lượng bề mặt mỗi hàn tốt, giảm nhu cầu gia công hoàn thiện [10].



Hình 2. Sơ đồ quá trình in 3D kim loại bằng phương pháp PBF [2].

Các nghiên cứu quốc tế và trong nước cho thấy hàn laser có thể:

Tăng độ bền mối hàn 10-20% [2], giảm 15-25% chi phí bảo trì thiết bị [7], hạn chế cong vênh và khuyết tật nhờ vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ [1], [2], [10].

Nhờ khả năng tập trung năng lượng vượt trội và hiệu suất cao, hàn laser ngày càng chiếm vai trò quan trọng trong chế tạo khuôn, sản xuất thiết bị năng lượng, hàng không, dầu khí và phục hồi chi tiết công nghiệp.

2.2. Công nghệ in 3D kim loại (Additive Manufacturing)

Công nghệ in 3D kim loại, đặc biệt nhóm công nghệ Powder Bed Fusion (PBF) như SLM/DMLS, đang trở thành nền tảng cốt lõi trong sản xuất thông minh. Nguyên lý tạo hình dựa trên nung chảy cục bộ lớp bột kim loại mỏng (20-60 μm) bằng chùm laser công suất 200-1000 W [4]. Quá trình in 3D kim loại bằng phương pháp PBF được thể hiện như hình 2, bề mặt bột kim loại được phủ đều, sau đó tia laser

quét tập trung để nung chảy và tạo lớp; lặp lại nhiều lần để tạo hình sản phẩm [2], [4].

Chất lượng tạo hình phụ thuộc mạnh vào mật độ năng lượng tuyến tính (Linear Energy Density – LED) [5], [6]:

$$LED = \frac{P}{v \cdot h}$$

Với v là tốc độ quét và h là khoảng cách đường quét.

Khi LED thấp ($<40 \text{ J/mm}^2$), bột không nóng chảy hoàn toàn, gây khuyết tật. Khi LED quá cao ($>120 \text{ J/mm}^2$), xuất hiện keyhole porosity do hồ nóng chảy quá sâu [5], [6].

Một số thông số ảnh hưởng lớn đến cấu trúc và cơ tính sản phẩm bao gồm: Độ dày lớp bột (20-60 μm), chiến lược quét (stripe, chessboard), nhiệt độ buồng in, hình thái hồ nóng chảy (melt pool geometry) [4], [5].

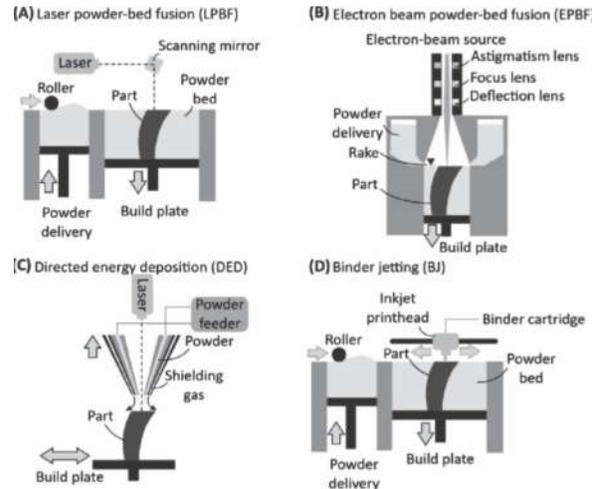
Với các vật liệu quan trọng trong công nghệ in 3D kim loại:

- Ti-6Al-4V đạt độ bền kéo 1080-1150 MPa và độ rỗng dưới 0,2% sau xử lý nhiệt [6].
- Inconel 718 cho độ bền nhiệt cao, phù hợp chi tiết turbine khí [5].
- Maraging Steel M300 cho độ cứng sau hóa già 52-55 HRC, ứng dụng mạnh trong khuôn ép nhựa [4].
- 316L có khả năng chống ăn mòn cao và cấu trúc hạt mịn [5].

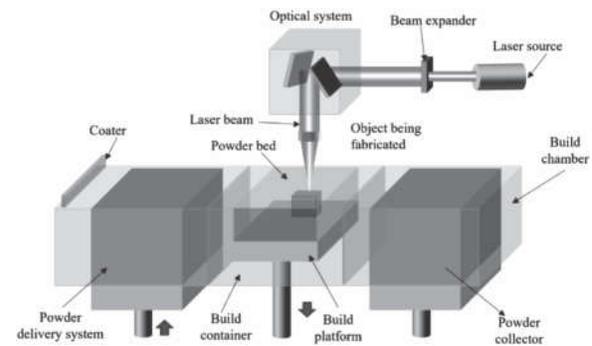
Tốc độ đắp vật liệu được mô tả bởi [4]:
 $\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho$

Trong công nghệ SLM, tốc độ đắp đạt

5-15 cm^3/h , phù hợp chi tiết độ chính xác cao; trong khi DED (Direct Energy Deposition) có thể đạt 30-60 cm^3/h , thích hợp phục hồi hoặc chế tạo chi tiết lớn [7], [8]. Các phương pháp in 3D kim loại phổ biến được thể hiện như hình 3.



Hình 3. Tổng hợp các phương pháp phổ biến trong in 3D kim loại [3].



Hình 4. Mô hình kết hợp nhiều nguồn năng lượng, cơ chế và quá trình để tối ưu hiệu suất và chất lượng mối hàn/clad trong in 3D [4].

So với gia công truyền thống, in 3D kim loại tiết kiệm 30-50% vật liệu, rút ngắn 40-60% thời gian R&D và chế tạo, tạo hình được các biên dạng phức tạp, kênh làm mát tối ưu và cấu trúc tổ ong mà CNC không thể gia công [4], [8].

Tại Việt Nam, công nghệ in 3D kim loại đã được thử nghiệm trong chế tạo khuôn

ép nhựa, chi tiết ô tô và sản phẩm theo nhu cầu tùy biến [9]. Với khả năng tạo hình ưu việt và tính linh hoạt cao, in 3D kim loại được dự báo sẽ trở thành trụ cột quan trọng trong sản xuất thông minh giai đoạn hướng tới Công nghiệp 5.0.

2.3. Phân tích hiệu quả kỹ thuật – kinh tế

Bảng 1. So sánh hàn laser và hàn truyền thống

Tiêu chí	Hàn truyền thống	Hàn laser
Độ bền mối hàn	Trung bình, dễ biến dạng	Tăng 10-20%, ít khuyết tật [1], [2]
Độ chính xác	$\pm 0,1-0,2$ mm	0,01-0,05 mm [3]
Vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ)	Rộng, dễ gây cong vênh	Nhỏ, hạn chế biến dạng
Chi phí bảo trì	Cao, mối hàn dễ xuống cấp	Giảm 15-25% nhờ tuổi thọ chi tiết tăng [7]
Tốc độ hàn	Trung bình	Nhanh hơn cho chi tiết mỏng/nhỏ
Chi phí đầu tư thiết bị	Thấp	Cao (gấp 3-5 lần hàn truyền thống) [7]
Ứng dụng phù hợp	Kết cấu phổ thông, vật liệu thông dụng	Vật liệu đặc biệt, mối hàn cần độ chính xác cao

Bảng 2. So sánh in 3D kim loại và gia công cơ khí truyền thống

Tiêu chí	Gia công truyền thống (SM)	In 3D kim loại (AM)
Nguyên lý	Cắt gọt từ phôi \rightarrow bỏ vật liệu dư	Bồi đắp từng lớp từ bột/dây kim loại [4], [5]
Độ chính xác	Rất cao với chi tiết đơn giản	Cao, có thể chế tạo biên dạng phức tạp [6]
Tiết kiệm vật liệu	Phế liệu nhiều	Giảm 30-50% nhờ chi dùng đúng lượng cần [5]
Thời gian R&D/chế tạo	Dài, cần nhiều nguyên công	Rút ngắn 40-60% so với truyền thống [6], [8]
Độ bền chi tiết	Cao, đồng nhất	Cao, có thể tối ưu cấu trúc rỗng, nhẹ mà bền [5]
Chi phí đầu tư	Trung bình	Rất cao (máy in 3D kim loại đắt tiền)
Ứng dụng phù hợp	Sản xuất hàng loạt, chi tiết đơn giản	Hàng không, y tế, khuôn mẫu, chi tiết đặc thù

2.4. Xu hướng và triển vọng ứng dụng

Xu hướng sản xuất hiện đại đang chuyển dịch mạnh mẽ sang các mô hình tích hợp, trong đó hàn laser và in 3D kim loại được kết nối trực tiếp vào các dây chuyền tự động hóa thông minh. Sự kết hợp giữa robot công nghiệp, hệ thống cảm biến đa trường (nhiệt – quang – lực) và thuật toán trí tuệ nhân tạo (AI) cho phép giám sát trạng thái mỗi hàn, hồ nóng chảy hoặc lớp bồi đắp theo thời gian thực với độ phân giải cao. Nhờ đó, các thông số công nghệ như công suất laser, tốc độ quét, chiến lược quét hoặc lưu lượng vật liệu được điều chỉnh tự động theo cơ chế phản hồi vòng kín (closed-loop control), giúp ổn định quá trình, giảm sai hỏng và tăng chất lượng bề mặt [8].

Hình 4 minh họa mô hình hybrid trong công nghệ in 3D laser, nơi nhiều nguồn năng lượng khác nhau – laser, plasma, hồ quang hoặc năng lượng điện tử – được kết hợp nhằm tối ưu hóa hình dạng hồ nóng chảy, mật độ năng lượng và đặc tính tế vi của lớp vật liệu bồi đắp. Theo [4], các hệ thống hybrid có khả năng điều khiển cấu trúc kim loại theo lớp (layer-wise microstructure control), từ đó cải thiện độ bền kéo, độ bền mỏi và độ dai va đập so với phương pháp PBF thuần túy.

Sự phát triển của các mô hình tích hợp này không chỉ nâng cao năng suất mà còn mở ra khả năng chế tạo các sản phẩm có biên dạng phức tạp, dung sai nhỏ và mức độ tùy biến cao. Đặc biệt đối với các chi tiết có cấu trúc rỗng tinh vi, kênh làm mát cong 3D hoặc biên dạng khí động phức tạp, sự kết hợp giữa hàn laser, đắp laser và in 3D kim loại tạo ra những lợi thế mà các phương pháp cắt gọt truyền thống không thể đạt được. Đây là nền tảng quan trọng đáp ứng yêu cầu của các hệ thống sản xuất thông minh theo định hướng Công nghiệp 4.0 và tiến tới Công nghiệp 5.0, nơi tính linh hoạt

và khả năng tự thích nghi của dây chuyền sản xuất là yếu tố then chốt.

Tại Việt Nam, các công nghệ này đang từng bước được triển khai trong những ngành công nghiệp then chốt như chế tạo khuôn mẫu, dầu khí, năng lượng, hàng không, cơ khí chính xác và điện tử [9], [10]. Các lĩnh vực này đều có nhu cầu cấp thiết trong việc đổi mới công nghệ nhằm nâng cao chất lượng bề mặt, tăng độ bền chi tiết, rút ngắn chu trình sản xuất và từng bước tham gia sâu hơn vào chuỗi cung ứng toàn cầu.

Tuy nhiên, việc ứng dụng rộng rãi vẫn gặp nhiều thách thức. Chi phí đầu tư ban đầu cho máy laser công suất cao, hệ thống LPBF/DED, robot sáu trục và cảm biến chuyên dụng còn lớn. Quy trình đánh giá và kiểm soát chất lượng theo tiêu chuẩn quốc tế như ISO 14744 (hàn laser) hoặc ISO/ASTM 52900 (AM) đòi hỏi năng lực kiểm định và phòng thí nghiệm đồng bộ. Bên cạnh đó, Việt Nam đang thiếu hụt nguồn nhân lực kỹ sư có khả năng thiết kế tối ưu topology, lập trình đường quét laser, mô phỏng trường nhiệt – cơ – hóa trong các quá trình bồi đắp hoặc liên kết kim loại. Do đó, để bắt kịp xu thế của các quốc gia công nghiệp tiên tiến, cần triển khai chiến lược dài hạn bao gồm: (1) Đầu tư nghiên cứu và phát triển (R&D) tại các trường đại học và viện công nghệ; (2) Đào tạo nhân lực chuyên sâu về vật liệu kim loại, mô phỏng số (CAE/FEM), điều khiển tự động và kỹ thuật laser; (3) Hợp tác giữa nhà trường – doanh nghiệp – viện nghiên cứu nhằm xây dựng dây chuyền hàn laser và in 3D kim loại thực nghiệm; (4) Từng bước nội địa hóa vật liệu bột kim loại và linh kiện công nghệ cao; (5) Chuẩn hóa quy trình đánh giá chất lượng theo tiêu chuẩn quốc tế.

Khi các yếu tố trên được đồng bộ hóa, Việt Nam có thể từng bước làm chủ, tối ưu và

khai thác hiệu quả công nghệ hàn laser và in 3D kim loại trong sản xuất công nghiệp hiện đại.

3. KẾT LUẬN

Hàn laser, phát triển từ hàn truyền thống, nổi bật với độ chính xác cao, tập trung năng lượng tốt và giảm biến dạng nhiệt, phù hợp chế tạo và phục hồi chi tiết chất lượng cao. In 3D kim loại (Additive Manufacturing) trở thành công nghệ mũi nhọn, cho phép chế tạo chi tiết phức tạp, tiết kiệm vật liệu và rút ngắn chu trình R&D. So với gia công truyền thống, hai công nghệ này vượt trội trong sản xuất sản phẩm phức tạp và tích hợp trong môi trường sản xuất thông minh. Xu hướng hiện nay là kết hợp với robot, cảm biến và trí tuệ nhân tạo, mở rộng ứng dụng trong hàng không, ô tô, năng lượng và y sinh. Như vậy, hàn laser và in 3D kim loại vừa là giải pháp kỹ thuật tiên tiến vừa là nền tảng cho sản xuất hiện đại trong kỷ nguyên Công nghiệp 4.0. ❖

Ngày nhận bài: **12/11/2025**

Ngày phản biện: **26/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010), “*Laser Material Processing*”. Springer.
- [2]. Katayama, S. (2013), “*Handbook of Laser Welding Technologies*”. Woodhead Publishing.
- [3]. Ready, J. F. (2001), “*Industrial Applications of Lasers*”. Academic Press.
- [4]. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015), “*Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*”. Springer.
- [5]. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016), “*Additive manufacturing of metals*”. Acta Materialia, 117, 371-392.
- [6]. Frazier, W. E. (2014), “*Metal additive manufacturing: A review*”. Journal of Materials Engineering and Performance, 23(6), 1917-1928.
- [7]. Gu, D. (2015), “*Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*”. Springer.
- [8]. Thompson, M. K., et al. (2016), “*Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*”. CIRP Annals, 65(2), 737-760.
- [9]. Nguyễn Văn Dũng, Trần Minh Đức (2020), “*Ứng dụng công nghệ in 3D trong sản xuất cơ khí tại Việt Nam*”. Tạp chí Khoa học & Công nghệ, 58(4), 45-52.
- [10]. Lê Quang Huy, Phạm Văn Phúc (2021), “*Tiềm năng ứng dụng công nghệ hàn laser trong chế tạo máy*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 65(3), 30-36.