

# Đánh giá tính chất cơ học và khả năng chống ăn mòn của hợp kim nền coban Stellite 6 trên thép 1045 bằng công nghệ hàn phủ Laser Cladding

Thang Le Toan

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam | Viện Nghiên cứu Cơ khí Quốc gia, Hà Nội, Việt Nam  
thanglt@utc.edu.vn

Nguyen Van Cuong

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam  
nguyencuong@utc.edu.vn (tác giả liên hệ)

Nhận bài: 20 tháng 2 năm 2025 | Sửa đổi: 19 tháng 3 năm 2025 | Chấp nhận: 5 tháng 4 năm 2025  
Phát hành theo giấy phép CC-BY 4.0 | Bản quyền © thuộc về các tác giả | DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.10654>

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát việc tối ưu hóa các thông số hàn phủ laser cho lớp phủ Stellite 6 trên thép 1045 thông qua các thí nghiệm thực tế, đảm bảo các thông số như công suất laser, tốc độ quét và tốc độ cấp bột được tối ưu trong điều kiện gia công thực tế. Kết quả cho thấy sự cải thiện đáng kể về hiệu năng lớp phủ. Quy trình tối ưu tạo ra tổ chức vi cấu trúc dạng dendrit tinh mịn với sự phân bố đồng đều của các pha Co- $\gamma$  và Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, giúp giảm thiểu khuyết tật và nâng cao độ ổn định cơ học. Lớp phủ đạt độ cứng vi mô tăng gấp 2,8 lần so với vật liệu nền chưa phủ, từ đó cải thiện rõ rệt khả năng chống mài mòn. Ngoài ra, các thử nghiệm ăn mòn điện hóa trong dung dịch NaCl 3,5% khối lượng cho thấy tốc độ ăn mòn giảm 200 lần và hiệu suất bảo vệ đạt 99,75%, vượt trội so với các lớp phủ trước đây vốn gặp vấn đề về pha loãng quá mức và không đồng nhất pha. Những kết quả này khẳng định tiềm năng của việc tối ưu hóa thực nghiệm công nghệ hàn phủ laser trong việc nâng cao đáng kể độ bền và hiệu năng làm việc của lớp phủ Stellite 6.

**Từ khóa-** hàn phủ Laser Cladding; Stellite 6; vi cấu trúc; độ cứng vi mô; ăn mòn điện hóa

## I. GIỚI THIỆU

Cùng với sự phát triển không ngừng của quá trình công nghiệp hóa, nhu cầu về phát triển bền vững đã trở thành ưu tiên hàng đầu. Việc áp dụng các lớp phủ có tính chất cơ học vượt trội lên bề mặt các chi tiết bị mài mòn hoặc các vật liệu nền thông dụng không chỉ cho phép tái sử dụng các chi tiết đã bị loại bỏ mà còn nâng cao khả năng chống mài mòn và chống ăn mòn của chúng. Điều này cho thấy vai trò then chốt của công nghệ lớp phủ bề mặt trong việc thúc đẩy sản xuất bền vững [1].

Hiện nay, các công nghệ phủ bề mặt được sử dụng rộng rãi bao gồm mạ điện, phun nhiệt, hàn đắp và hàn phủ laser [2–5]. Mạ điện được ưa chuộng nhờ hiệu suất cao và chi phí thấp; tuy nhiên, việc ứng dụng rộng rãi của nó ngày càng bị hạn chế do các vấn đề nghiêm trọng về môi trường. Phun nhiệt cũng được sử dụng phổ biến, nhưng có những hạn chế như độ rỗng cao, khuyết tật lớp phủ và sự phụ thuộc vào liên kết cơ học, vốn thường không ổn định. Hàn đắp tạo liên kết luyện kim với nền vật liệu nhưng gặp nhược điểm là độ chính xác thấp và tỷ lệ hòa trộn cao, từ đó ảnh hưởng đến chất lượng lớp phủ. Với sự phát triển của tự động hóa, các công nghệ sản xuất bồi đắp (additive manufacturing) đã trở nên ngày càng phổ biến [6]. Trong số đó, hàn phủ laser nổi bật như một quá trình có mức độ tự động hóa cao, mang lại chất lượng lớp phủ tốt, độ hòa trộn thấp và biến

dạng nhiệt nhỏ. Trong hàn phủ laser, chùm tia laser năng lượng cao được sử dụng để làm nóng chảy đồng thời vật liệu phủ và vật liệu nền, tạo ra một lớp đông đặc có liên kết luyện kim với vật liệu nền. Phương pháp này mang lại nhiều ưu điểm như mật độ năng lượng cao, biến dạng nhiệt nhỏ và liên kết giao diện bền vững [7]. Vật liệu phủ có thể được cấp theo hai phương pháp chính: bột đặt sẵn và cấp bột đồng trục, trong đó phương pháp cấp bột đồng trục được ưa chuộng hơn nhờ mức độ tự động hóa và hiệu suất cao hơn [8]. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã khảo sát quá trình hàn phủ laser các lớp hợp kim trên nền thép. Các tác giả trong [9] đã nghiên cứu hàn phủ laser đồng trục hợp kim nền coban Stellite 6 trên nền gang xám, phân tích sự phụ thuộc của vi cấu trúc và tính chất cơ học theo công suất laser.

Trong [10], bột Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> được phủ lên thép C45, cho thấy ảnh hưởng của tốc độ quét và tốc độ cấp bột đến vi cấu trúc và độ cứng, cũng như tác động của chúng đến độ hòa trộn và vùng ảnh hưởng nhiệt. Các tác giả trong [11] đã nghiên cứu vi cấu trúc và khả năng chống mài mòn của lớp phủ TiC trên nền gang cầu bằng phương pháp hàn phủ laser với bột đặt sẵn, từ đó thu được sự cải thiện đáng kể về độ cứng và

khả năng chống mài mòn. Trong [12], hàn phủ laser hợp kim Inconel 625 trên thép không gỉ AISI 304 đã làm tăng độ cứng của lớp phủ lên 1,5 lần so với vật liệu nền. Tương tự, các tác giả trong [13] đã báo cáo sự cải thiện đáng kể về khả năng chống ăn mòn của lớp phủ Ni60CuMoW trên thép 45 trong dung dịch NaCl 3,5% khối lượng. Cuối cùng, các tác giả trong [14] đã chứng minh độ cứng Vickers vượt trội và khả năng chống ăn mòn cao đạt được nhờ công nghệ hàn phủ laser sử dụng graphene trên thép carbon 45.

Trong nghiên cứu này, Stellite 6—một siêu hợp kim nền coban—được phủ lên thép carbon trung bình 1045 bằng phương pháp hàn phủ laser. Sau đó, các tính chất cơ học và khả năng chống ăn mòn của lớp phủ thu được được đánh giá nhằm xác định khả năng ứng dụng thực tế của Stellite 6 trong việc kéo dài tuổi thọ chi tiết và thúc đẩy các giải pháp kỹ thuật bền vững.

## II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Vật liệu nền sử dụng trong nghiên cứu này là thép AISI 1045 (thép carbon trung bình) với kích thước 150 mm × 60 mm × 20 mm. Bề mặt vật liệu nền được đánh bóng và làm sạch bằng acetone trước khi tiến hành phủ laser. Vật liệu phủ là bột hợp kim Stellite 6 dạng hình cầu, một hợp kim nền coban với kích thước hạt từ 50–150 μm, được sấy khô trong 30 phút trước khi phủ. Thành phần hóa học của cả bột Stellite 6 và thép nền 1045, theo thông tin từ nhà cung cấp, được trình bày trong Bảng I.

BẢNG I. THÀNH PHẦN HÓA HỌC CỦA BỘT PHỦ VÀ VẬT LIỆU NỀN (KHỐI LƯỢNG %)

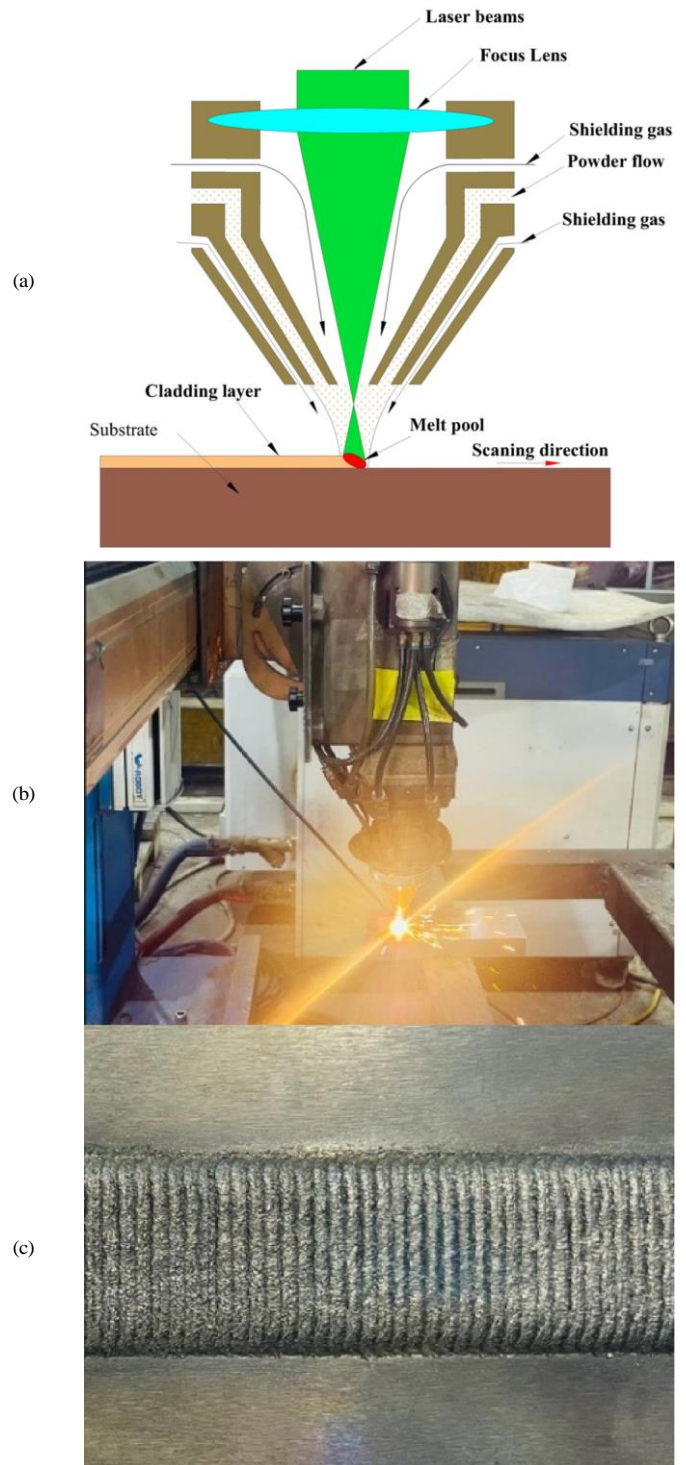
Thành phần	Co	C	Si	Fe	Cr	Mn	Mo	W
Stellite 6	Bal	1.1	1.0	1.5	28.5	1	1.2	4.2
Thành phần	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
Thép 1045	Bal	0.45	0.36	0.5	0.25	≤0.2	≤0.04	≤0.04

Quá trình hàn phủ laser được thực hiện bằng hệ thống laser sợi quang Yb (Raycus RFL-C6000), được trang bị đầu cấp bột đồng trục gắn trên bàn máy CNC ba trục. Hệ thống cấp bột được điều khiển bằng đĩa quay và dẫn vào đầu hàn phủ laser bằng khí argon. Các thông số của quá trình phủ laser được lập trình và điều khiển thông qua máy tính. Các thông số của quá trình hàn phủ laser được trình bày trong Bảng II.

BẢNG II. CÁC THÔNG SỐ CỦA QUÁ TRÌNH HÀN PHỦ LASER

Thông số	Giá trị
Công suất laser (kW)	2000
Tốc độ quét (mm/phút)	800
Tốc độ cấp bột (g/phút)	18
Lưu lượng khí cấp bột (lít/phút)	7.2
Lưu lượng khí bảo vệ (lít/phút)	22
Đường kính điểm laser (mm)	3
Khoảng cách hội tụ (mm)	16
Tỷ lệ chồng lấn (%)	50
Chiều dày lớp phủ (mm)	2

Nguyên lý của quá trình hàn phủ laser được minh họa trong Hình 1(a). Quá trình hàn phủ, với các thông số được thiết lập theo Bảng II, được thể hiện trong Hình 1(b), và mẫu sau khi hàn phủ được trình bày trong Hình 1(c).



Hình 1. Quá trình hàn phủ laser: (a) nguyên lý hàn phủ laser; (b) thực nghiệm; (c) mẫu sau khi hàn phủ laser.

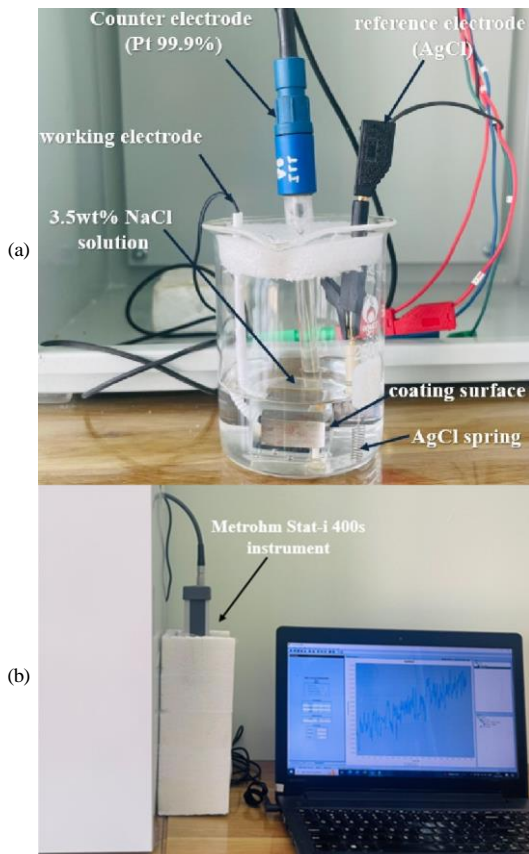
Để xác định vi cấu trúc của lớp phủ, mẫu sau khi phủ được cắt bằng phương pháp cắt dây, sau đó được mài và đánh bóng bằng giấy nhám SiC với độ nhám từ 1000 đến 2000 grit. Bề mặt tiếp tục được đánh bóng bằng bột kim cương tổng hợp và bột nhôm, rồi cuối cùng được làm sạch bằng cồn tinh khiết. Mẫu sau khi đánh bóng và làm sạch được sấy khô trong tủ sấy chân không trong 30 phút. Để phân biệt rõ các vùng vật liệu và các

loại hạt tinh thể, bề mặt mẫu được tẩy thực (etching) (Hình 2).

Kính hiển vi quang học Axiovert 40MAT được sử dụng để quan sát vi cấu trúc của lớp phủ và vùng biên giới giữa lớp phủ và vật liệu nền. Độ cứng vi mô của lớp phủ được đo bằng máy đo độ cứng IndentaMet 1106, tuân theo tiêu chuẩn ASTM E384-17. Phép thử độ cứng Vickers (HV0.3) được sử dụng với tải trọng 0,3 kgf trong thời gian 15s. Các đường phân bố độ cứng được xây dựng bằng cách thực hiện 10 phép đo, trong đó 5 điểm nằm trên lớp phủ và 5 điểm nằm trên vật liệu nền.



Hình 2. Mẫu sau khi chuẩn bị.



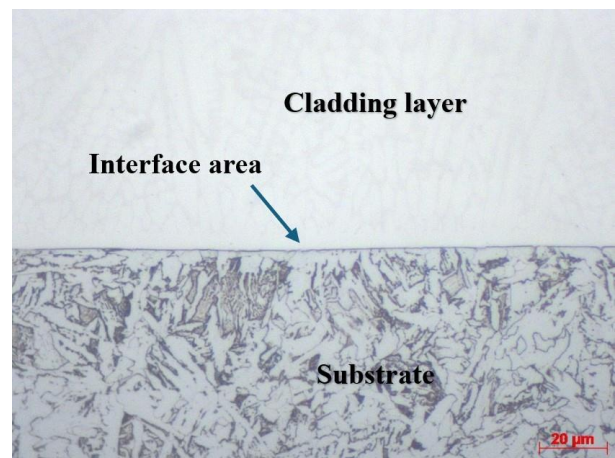
Hình 3. (a) Hệ thống thí nghiệm ăn mòn điện hóa; (b) quá trình đo ăn mòn điện hóa.

Để đo khả năng chống ăn mòn điện hóa của lớp phủ laser, bề mặt lớp phủ được chuẩn bị với kích thước 10 mm × 10 mm. Bề mặt được mài bằng giấy nhám đến độ nhám 2000 grit, sau đó được đánh bóng bằng bột kim cương và bột nhôm, rồi làm sạch bằng cồn và sấy khô. Một dây dẫn điện được nối vào mặt đối diện của bề mặt mẫu, trong khi các bề mặt còn lại được phủ keo acrylic để ngăn tiếp xúc với môi trường ăn mòn. Thử nghiệm ăn mòn được tiến hành trong dung dịch NaCl 3,5% khối lượng, mô phỏng môi trường nước biển. Khả năng chống ăn mòn điện hóa được đo bằng thiết bị Metrohm Stat-i 400s, sử dụng phần mềm DropView 8400. Hệ thống thí nghiệm và quy trình đo được minh họa lần lượt trong Hình 3(a) và Hình 3(b).

### III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### A. Phân tích vi cấu trúc

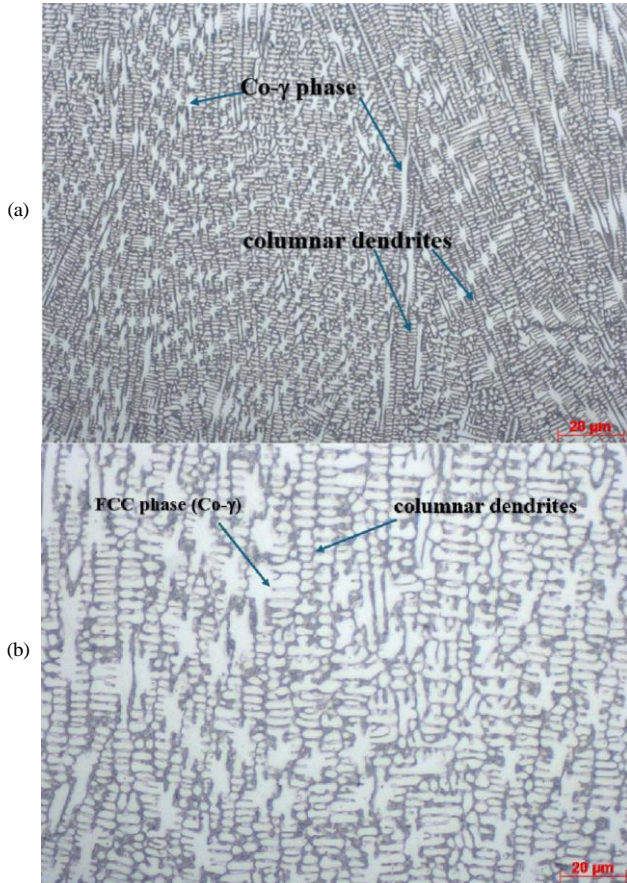
Hình 4 thể hiện vi cấu trúc tại vùng biên giới giữa lớp phủ và vật liệu nền, được quan sát dưới kính hiển vi với độ phóng đại 500 lần. Vi cấu trúc của thép nền 1045 bao gồm các pha ferrit ( $\alpha$ -Fe) màu trắng xen kẽ với các pha peclit màu nâu, đây là dạng tổ chức điển hình của thép cacbon trung bình khi được làm nguội chậm từ vùng austenit ( $\gamma$ -Fe). Tại vùng tiếp giáp giữa lớp phủ và vật liệu nền, có thể quan sát được cấu trúc dạng mặt phẳng kèm theo sự khuếch tán nguyên tử, có thể tồn tại pha hỗn hợp Fe-Co-Cr. Không phát hiện vết nứt hoặc lỗ rỗng tại vùng giao diện giữa lớp phủ và nền, cho thấy liên kết luyện kim tốt.



Hình 4. Vi cấu trúc tại vùng giao diện lớp phủ/vật liệu nền ở độ phóng đại 500 lần.

Vi cấu trúc của lớp phủ được thể hiện trong Hình 5. Hình ảnh cho thấy tổ chức dendrit dạng cột, đặc trưng của hợp kim Stellite 6 được đông đặc nhanh. Lớp phủ chủ yếu gồm các pha Co- $\gamma$  (nền sáng) xen kẽ với các pha cacbit Cr7C3 màu tối. Ngoài ra, do trong hợp kim có chứa vonfram, có thể xuất hiện thêm các pha cacbit vonfram WC. Nền giàu Co này mang lại độ dẻo cao và khả năng chống ăn mòn tốt. Sự phát triển của dendrit diễn ra từ vùng giao diện hướng lên bề mặt lớp phủ, theo hướng gradient nhiệt. Các dendrit tương đối mịn và sắp xếp theo dạng dải song song, cho thấy tốc độ làm nguội nhanh và quá trình đông đặc được kiểm soát tốt. Sự đồng đều và tinh mịn của cấu trúc dendrit cho thấy các thông

số hàn phủ laser được lựa chọn đã tạo ra lớp phủ đặc chắc, chất lượng cao với chiều dày xấp xỉ 2 mm.



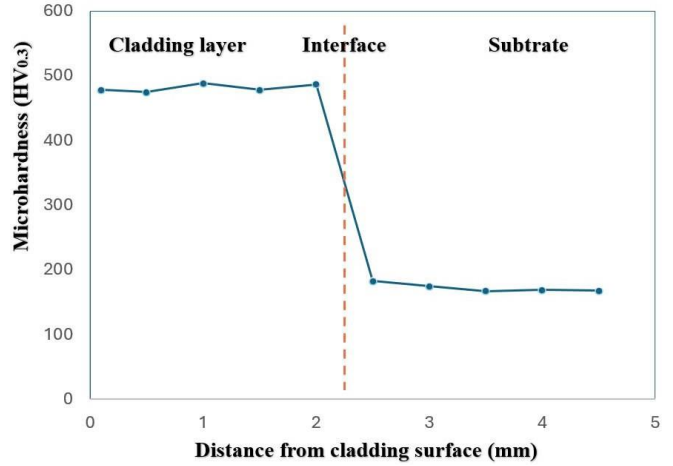
Hình 5. Vi cấu trúc của lớp phủ: (a) vi cấu trúc lớp phủ ở độ phóng đại 200 lần; (b) vi cấu trúc lớp phủ ở độ phóng đại 500 lần.

**B. Độ cứng vi mô**

Hình 6 thể hiện đường phân bố độ cứng vi mô Vickers được đo tại mười điểm từ bề mặt lớp phủ qua vùng giao diện đến vật liệu nền. Độ cứng vi mô của thép nền AISI 1045, dựa trên năm điểm đo, có giá trị trung bình khoảng 172,56 HV<sub>0.3</sub>. Điểm đo xa vùng giao diện nhất có độ cứng thấp nhất là 168 HV<sub>0.3</sub>, sau đó tăng dần lên 182,9 HV<sub>0.3</sub> tại điểm gần vùng giao diện. Sự gia tăng độ cứng dần dần về phía vùng giao diện cho thấy sự khuếch tán của các nguyên tố hợp kim như Co và Cr từ lớp phủ vào nền, qua đó làm tăng độ cứng của vùng nền lân cận.

Ngược lại, năm điểm đo trong lớp phủ Stellite 6 cho thấy giá trị độ cứng vi mô trung bình cao hơn đáng kể, đạt 481,64 HV<sub>0.3</sub>. Các giá trị độ cứng tại các điểm này tương đối đồng đều, trong đó giá trị cao nhất được ghi nhận tại điểm đo thứ ba là 488,7 HV<sub>0.3</sub>. Độ cứng cao này chủ yếu được cho là do sự hiện diện của các pha cacbit cứng Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, góp phần cải thiện khả năng chống mài mòn của lớp phủ. Đáng chú ý, điểm đo gần vùng giao diện nhất có độ cứng 487 HV<sub>0.3</sub>, cao hơn nhẹ so với giá trị trung bình, cho thấy mức độ hòa trộn Fe từ nền vào lớp phủ là rất nhỏ. Kết quả

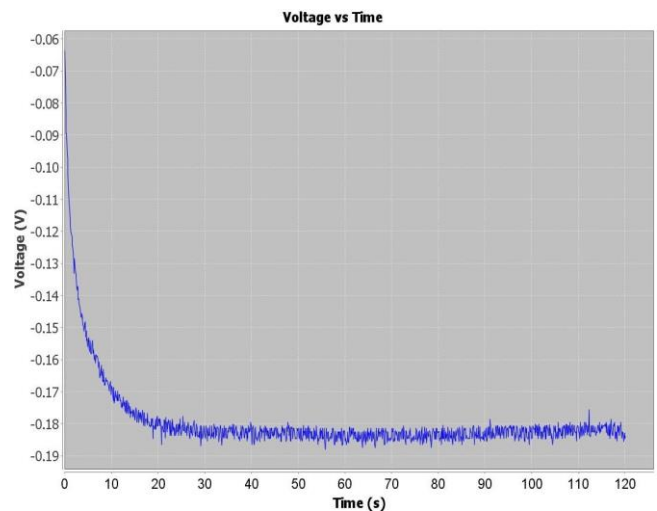
này khẳng định rằng tính toàn vẹn cơ học và độ cứng của lớp phủ tại vùng gần giao diện được duy trì tốt.



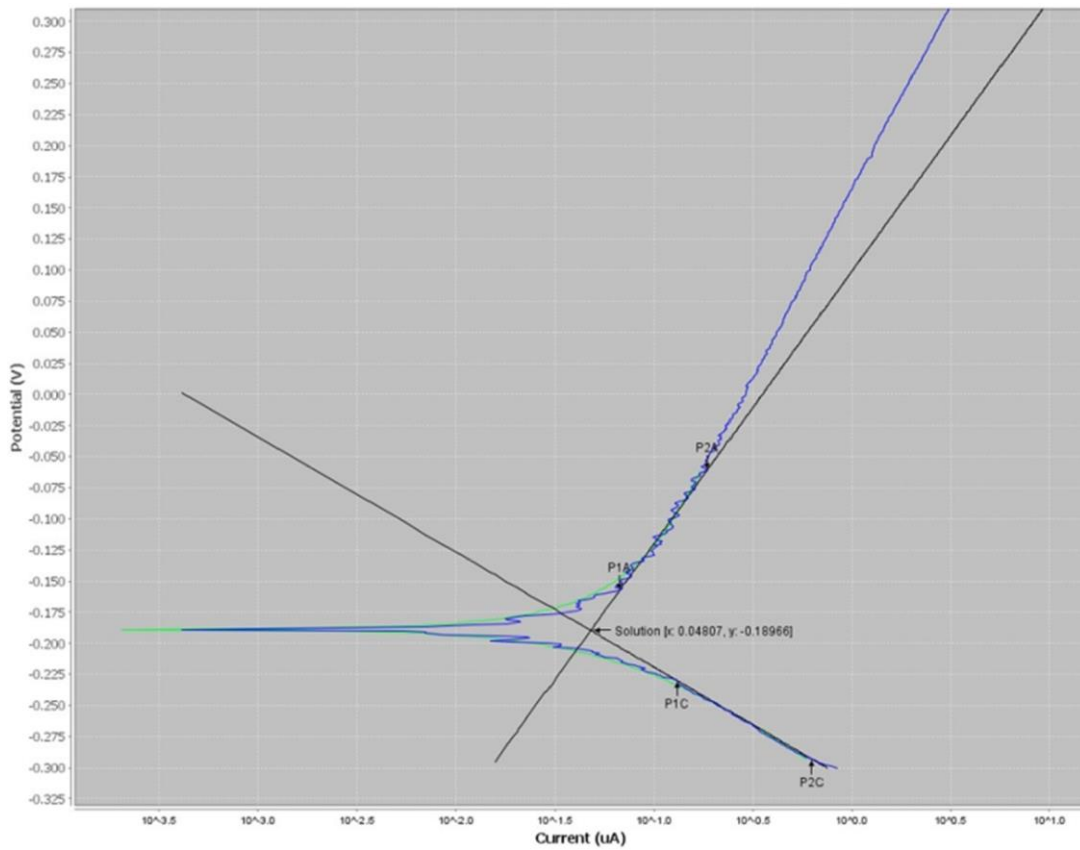
Hình 6. Biểu đồ phân bố độ cứng vi mô Vickers theo phương dọc của mẫu hàn phủ laser hợp kim Stellite 6.

**C. Khả năng chống ăn mòn điện hóa**

Khả năng chống ăn mòn điện hóa của lớp phủ hợp kim Stellite 6 được đánh giá thông qua các thí nghiệm đo ăn mòn điện hóa. Trước khi tiến hành đo, điện cực làm việc được ngâm trong dung dịch NaCl 3,5% khối lượng trong 30 phút để đạt trạng thái ổn định của các giá trị đo. Sau đó, thế mạch hở ( $E_{ocp}$ ) được đo, đóng vai trò là giá trị nền cho phân tích ăn mòn. Như thể hiện trong Hình 7, giá trị  $E_{ocp}$  ổn định khoảng -0,185 V.



Hình 7. Đồ thị thế mạch hở ( $E_{ocp}$ ).



**Corrosion Analysis** ✕

Selected points:

	Log(i)	V
1st anodic point:	0.07000	-0.15600
2nd anodic point:	0.16208	-0.07600
1st cathodic point:	0.13125	-0.23000
2nd cathodic point:	0.53292	-0.28800

Results:

i corrosion	0.08870 $\mu$ A
J corrosion	0.08870 $\mu$ A/cm <sup>2</sup>
ba	0.12354 V/dec
bc	0.42790 V/dec
Rp	469.30138 KOhm
E corr, obs	-0.18900 V
E corr, calc	-0.18945 V
E begin	-0.28800 V
E end	-0.07600 V
Corrosion rate	0.00199 mm/year
	0.07851 mil/year

Hình 8. Đường cong phân cực Tafel và kết quả phân tích ăn mòn của mẫu hàn phủ laser hợp kim Stellite 6.

Sau giai đoạn ổn định, phép đo quét thế tuyến tính (Linear Sweep Voltammetry – LSV) được thực hiện trong khoảng thế bao gồm nhằm xác định các đặc tính điện hóa của lớp phủ. Kết quả LSV được phân tích bằng phần mềm DropView 8400, có sử dụng các thông số đặc trưng của vật liệu hợp kim Stellite 6: khối lượng đương lượng mol  $M = 59,5$  (g/mol), khối lượng riêng hợp kim  $\rho = 8,44$  (g/cm<sup>3</sup>) và diện tích bề mặt điện cực  $A = 1$  cm<sup>2</sup>. Đường cong phân cực và các thông số ăn mòn liên quan (thế ăn mòn  $E_{corr}$ , dòng ăn mòn  $I_{corr}$ , mật độ dòng ăn mòn  $J_{corr}$ ) được trích xuất như trình bày trong Hình 8.

Phân tích điện hóa cho thấy thế ăn mòn  $E_{corr}$  đạt  $-0,189$  V, cho thấy xu hướng nhiệt động của lớp phủ đối với ăn mòn là thấp. Mật độ dòng ăn mòn  $I_{corr}$  rất nhỏ, chỉ đạt  $0,00887$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , tương ứng với tốc độ ăn mòn (CR) tính toán là  $0,00199$  mm/năm. Những kết quả này khẳng định lớp phủ laser Stellite 6 thể hiện khả năng chống ăn mòn rất tốt trong môi trường NaCl 3,5% khối lượng.

Để đặt trong bối cảnh so sánh, Bảng III trình bày sự đối chiếu các thông số ăn mòn điện hóa của lớp phủ Stellite 6 với vật liệu nền thép AISI 1045 chưa phủ, dựa trên các nghiên cứu trước đây [13, 14].

BẢNG III. CÁC THÔNG SỐ ĐIỆN HÓA CỦA LỚP PHỦ HỢP KIM STELLITE 6 VÀ VẬT LIỆU NỀN THÉP 1045

Thông số	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	CR (mm/year)	$b_a$ (V/dec)	$b_c$ (V/dec)
Vật liệu nền [14]	-0.660	35.8	0.421	0.1433	0.1047
Stellite 6	-0.189	0.0887	0.00199	0.1235	0.4279

Mật độ dòng ăn mòn của thép 1045 cao hơn đáng kể so với lớp phủ Stellite 6, cho thấy tính năng bảo vệ vượt trội của lớp phủ. Hơn nữa, tốc độ ăn mòn của thép 1045 lớn hơn hơn 200 lần so với mẫu đã được phủ. Hiệu suất bảo vệ (PE%) của lớp phủ Stellite 6 được tính theo công thức sau [15]:

$$PE\% = \frac{I_{corr}(uncoated) - I_{corr}(coated)}{I_{corr}(uncoated)} \cdot 100\%$$

Bằng cách thay các giá trị mật độ dòng ăn mòn từ Bảng III vào công thức, hiệu suất bảo vệ của lớp phủ Stellite 6 được xác định là 99,75%.

#### IV. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, lớp phủ hợp kim Stellite 6 đã được tạo thành trên thép cacbon trung bình 1045 bằng phương pháp hàn phủ laser. Sự tiến hóa vi cấu trúc, tính chất cơ học và hành vi ăn mòn điện hóa của lớp phủ đã được nghiên cứu một cách hệ thống.

Phân tích vi cấu trúc cho thấy vùng giao diện giữa lớp phủ và vật liệu nền không có khuyết tật, không quan sát thấy vết nứt hoặc lỗ rỗng, chứng tỏ liên kết luyện kim tốt. Từ vùng giao diện nền–lớp phủ đến bề mặt, lớp phủ thể hiện cấu trúc vi mô có gradient, chuyển từ dạng phẳng sang dạng tế bào, sau đó là dạng dendrit cột và cuối cùng là cấu trúc tinh thể. Hướng phát triển của dendrit phù hợp với gradient nhiệt trong quá trình đông đặc, phát triển từ vùng giao diện hướng lên bề mặt lớp phủ.

Lớp phủ thể hiện độ cứng vi mô tương đối đồng đều, với giá trị trung bình đạt  $481,64$   $\text{HV}_{0,3}$ , cao gấp khoảng 2,8 lần so với độ cứng trung bình của thép nền 1045. Sự gia tăng đáng kể về độ cứng này cho thấy tính chất cơ học và khả năng chống mài mòn của vật liệu nền sau khi phủ đã được cải thiện rõ rệt.

Thử nghiệm ăn mòn điện hóa trong dung dịch NaCl 3,5% khối lượng đã xác nhận khả năng chống ăn mòn xuất sắc của lớp phủ Stellite 6. Mật độ dòng ăn mòn ( $I_{corr}$ ) đo được của lớp phủ chỉ đạt  $0,00887$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , thấp hơn đáng kể so với thép 1045 chưa phủ. Ngoài ra, tốc độ ăn mòn của lớp phủ thấp hơn khoảng 200 lần so với vật liệu nền. Hiệu suất bảo vệ tính toán của lớp phủ đạt 99,75%, cho thấy khả năng bảo vệ vượt trội của lớp phủ đối với vật liệu nền trong môi trường môi trường mô phỏng nước biển.

Những kết quả này khẳng định rằng hàn phủ laser bằng hợp kim Stellite 6 là một phương pháp hiệu quả để cải thiện đáng kể tính năng bề mặt của thép 1045, cả về tính chất cơ học và khả năng chống ăn mòn.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (UTC) theo mã đề tài T2025-CK-006.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Schopphoven, A. Gasser, K. Wissenbach, and R. Poprawe, "Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying," *Journal of Laser Applications*, vol. 28, no. 2, May 2016, Art. no. 022501, <https://doi.org/10.2351/1.4943910>.
- [2] M. S. Safavi and F. C. Walsh, "Electrodeposited Co-P alloy and composite coatings: A review of progress towards replacement of conventional hard chromium deposits," *Surface and Coatings Technology*, vol. 422, Sep. 2021, Art. no. 127564, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127564>.
- [3] J. N. Ndumia, M. Kang, B. V. Gbenontin, J. Lin, and S. M. Nyambura, "A Review on the Wear, Corrosion and High-Temperature Resistant Properties of Wire Arc-Sprayed Fe-Based Coatings," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 10, Sep. 2021, Art. no. 2527, <https://doi.org/10.3390/nano11102527>.
- [4] A. W. Fandé, R. V. Taiwade, and L. Raut, "Development of activated tungsten inert gas welding and its current status: A review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 37, no. 8, pp. 841–876, Jun. 2022, <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2039695>.
- [5] L. Zhou *et al.*, "Research status and prospect of extreme high-speed laser cladding technology," *Optics & Laser Technology*, vol. 168, Jan. 2024, Art. no. 109800, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109800>.
- [6] L. C. Dang, C. V. Nguyen, A. H. Le, and D. T. Bui, "A Study on the Influence of Printing Orientation in Metal Printing Using Material Extrusion Technology on the Mechanical Properties of 17-4 Stainless Steel Products," *Journal of Machine Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 89–100, Dec. 2023, <https://doi.org/10.36897/jme/170509>.
- [7] Y. Liu, Y. Ding, L. Yang, R. Sun, T. Zhang, and X. Yang, "Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 66, pp. 341–363, Jun. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.061>.
- [8] K. Wang, Z. Zhang, D. Xiang, and J. Ju, "Research and Progress of Laser Cladding: Process, Materials and Applications," *Coatings*, vol. 12, no. 10, Sep. 2022, Art. no. 1382,

- <https://doi.org/10.3390/coatings12101382>.
- [9] M. Kiehl, A. Scheid, K. Graf, B. Ernst, and U. Tetzlaff, "Coaxial Laser Cladding of Cobalt-Base Alloy Stellite™ 6 on Grey Cast Iron Analysis of the Microstructural and Mechanical Properties Depending on the Laser Power," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 8, pp. 3821–3838, Apr. 2023, <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07358-3>.
- [10] F. X. Huang, Z. H. Jiang, X. M. Liu, J. S. Lian, and L. Chen, "Effects of Process Parameters on Microstructure and Hardness of Layers by Laser Cladding," *ISIJ International*, vol. 51, no. 3, pp. 441–447, 2011, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.441>.
- [11] E. R. I. Mahmoud and H. F. El-Labban, "Microstructure and Wear Behavior of TiC Coating Deposited on Spheroidized Graphite Cast Iron Using Laser Surfacing," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 4, no. 5, pp. 696–701, Oct. 2014, <https://doi.org/10.48084/etasr.483>.
- [12] V. P. Vijeesh, M. R. Ramesh, and A. D. Anoop, "Inconel 625 Coatings on AISI 304 Steel using Laser Cladding: Microstructure and Hardness," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 13, no. 5, pp. 11911–11916, Oct. 2023, <https://doi.org/10.48084/etasr.6297>.
- [13] H. Liu, C. Wang, X. Zhang, Y. Jiang, C. Cai, and S. Tang, "Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder," *Surface and Coatings Technology*, vol. 228, pp. S296–S300, Aug. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.115>.
- [14] W. Wu, R. Chen, Z. Yang, Z. He, Y. Zhou, and F. Lv, "Corrosion resistance of 45 carbon steel enhanced by laser graphene-based coating," *Diamond and Related Materials*, vol. 116, Jun. 2021, Art. no. 108370, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108370>.
- [15] E. Ghiamati Yazdi, Z. S. Ghahfarokhi, and M. Bagherzadeh, "Protection of carbon steel corrosion in 3.5% NaCl medium by aryldiazonium grafted graphene coatings," *New Journal of Chemistry*, vol. 41, no. 21, pp. 12470–12480, 2017, <https://doi.org/10.1039/C7NJ01655G>.