

TỔ CHỨC VÀ TÍNH CHẤT CỦA LỚP PHỦ HỢP KIM ENTROPY CAO CHẾ TẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHUN PHỦ LASER

Nguyễn Thanh Hùng^{1,*}, Trần Văn Nghĩa¹, Lý Xuân Nam²

¹Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Trường Cao đẳng Công nghiệp quốc phòng

Tóm tắt

Lớp phủ hợp kim entropy cao FeMnNiCrCu_{0.5} đã được chế tạo trên bề mặt thép C45 bằng phương pháp phun phủ laser (Laser Cladding). Nhiều xạ tia X (XRD), hiển vi điện tử quét (SEM) và phân tích phổ phân tán năng lượng (EDS) được sử dụng để đánh giá cấu trúc pha, tổ chức tế vi và thành phần hoá học của lớp phủ. Độ cứng và tính chất chống ăn mòn của lớp phủ cũng được nghiên cứu bằng đo độ cứng tế vi và đo dòng ăn mòn Tafel. Kết quả chỉ ra rằng, một lớp phủ có liên kết tốt với thép nền được hình thành, cấu trúc lớp phủ gồm vùng ảnh hưởng nhiệt, vùng liên kết và vùng lớp phủ. Tổ chức tế vi của lớp phủ thể hiện một cấu trúc dạng nhánh cây điển hình phát triển từ tấm thép nền. Lớp phủ có cấu trúc một pha lập phương diện tâm (face-center cubic - FCC) với độ cứng lớp phủ khoảng 195 HV_{0.2}. Trong môi trường axit H₂SO₄ 0.5M, lớp phủ có tính chống ăn mòn tốt hơn thép nền C45, điều này cho phép nó có thể được sử dụng như một lớp phủ chống ăn mòn trong các ứng dụng kỹ thuật.

Từ khóa: Hợp kim entropy cao; phun phủ laser; cấu trúc FCC; chống ăn mòn.

1. Giới thiệu

Khái niệm về hợp kim entropy cao (high-entropy alloys - HEA) đã được học giả Yeh và cộng sự [1] công bố nghiên cứu đầu tiên vào năm 2004. Các hợp kim truyền thống như: thép, hợp kim nhôm, hợp kim niken... là những hợp kim dựa trên một nguyên tố chính hàm lượng chiếm hơn 50% và được hợp kim hoá lượng nhỏ các nguyên tố khác để cải thiện tổ chức, tính chất của chúng. Khác với hợp kim truyền thống, HEA được định nghĩa là hợp kim đa nguyên tố, cấu thành từ 5 nguyên tố chính trở lên có phần trăm nguyên tử bằng nhau hoặc gần bằng nhau, hàm lượng của mỗi loại nguyên tố nằm trong khoảng 5÷35 at.% . Do đặc trưng giá trị entropy cao của loại hợp kim này, chúng có xu hướng hình thành cấu trúc dung dịch rắn như lập phương diện tâm (face-center cubic - FCC), lập phương tâm khối (body-center cubic - BCC) hoặc sáu phương xếp chặt (hexagonal close-packed - HCP) hơn là hình thành các pha trung gian, pha liên kim loại. Một số hệ hợp kim điển hình ứng với từng cấu trúc dung dịch rắn như CrMnFeNiCo (pha FCC) [2], TaNbHfZrTi (pha BCC) [3], GdHoLaTbY (pha HCP) [4].

* Email: thanhhungvktqs@gmail.com

Nghiên cứu về HEA cho thấy rằng chúng có độ cứng cao [5], độ bền nhiệt cao [6], khả năng chống mài mòn, ăn mòn tốt [7-9]. Với những đặc tính này, HEA có tiềm năng phù hợp làm lớp phủ bề mặt. Gần đây, nhiều phương pháp được sử dụng để chế tạo lớp phủ HEA, chẳng hạn như phun phủ plasma [10], phun nguội [11], phún xạ magnetron [12], và phun phủ laser [13]. So với các phương pháp khác, công nghệ phun phủ laser cho thấy nhiều ưu điểm như tốc độ làm nguội nhanh, liên kết luyện kim tốt giữa lớp phủ và tấm đế, tổ chức lớp phủ nhỏ mịn. Ngoài ra, lớp phủ được chế tạo bằng phương pháp phun phủ laser có độ dày cao hơn các lớp phủ khác, điều này phù hợp với các ứng dụng kỹ thuật thực tế [14]. Ye và cộng sự [15] đã chế tạo lớp phủ HEA $Al_xFeCoNiCuCr$ trên tấm thép C45 bằng kỹ thuật phun phủ laser. Kết quả đã cho thấy thành phần pha của các lớp phủ bao gồm các dung dịch rắn FCC và BCC, việc tăng hàm lượng nhôm có thể thúc đẩy việc tạo ra cấu trúc pha BCC. Hợp kim có hàm lượng nguyên tử Al cao hơn thể hiện độ cứng cao hơn, chống mài mòn và ăn mòn tốt hơn. Trên nền nhôm, Shi và cộng sự [16] cũng đã chế tạo thành công lớp phủ HEA $AlCrFeNiCuCo$ bằng kỹ thuật phun phủ laser. Lớp phủ này có cấu trúc hỗn hợp 2 pha (FCC + BCC), có thể đạt độ cứng 500 HV_{0.2}, và cho thấy khả năng chống ăn mòn tốt trong môi trường axit H₂SO₄.

Các nguyên tố được sử dụng phổ biến trong HEA là các kim loại chuyển tiếp như Fe, Co, Cr, Mn, Ni, Cu, Ti, Mo. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả lựa chọn các kim loại chuyển tiếp thường gặp với giá thành thấp và sử dụng công nghệ phủ laser chế tạo thành công lớp phủ hợp kim entropy cao $FeMnNiCrCu_{0.5}$. Các nghiên cứu trước đã chỉ ra rằng Cu dễ bị thiên tích do nhiệt trộn (enthalpy of mixing) của nó với các nguyên tố còn lại đều có giá trị dương [17, 18]. Để giảm bớt sự thiên tích thành phần trong hợp kim, nhóm tác giả đã giảm một nửa hàm lượng Cu (theo at.%) so với các nguyên tố khác. Cấu trúc pha, đặc điểm tổ chức tế vi, tính chất điện hoá của lớp phủ đã được nghiên cứu.

2. Thực nghiệm

Chọn tấm thép C45 làm tấm đế, kích thước 100 mm (dài) × 50 mm (rộng) × 10 mm (dày). Bề mặt được mài bằng giấy ráp để loại bỏ lớp ôxi hoá và tạp chất, dùng cồn rửa sạch loại bỏ dầu mỡ trên bề mặt tấm thép. Vật liệu chế tạo lớp phủ HEA là các bột kim loại Fe, Mn, Ni, Cr và Cu đơn chất, độ tinh khiết lớn hơn 99,97% được cung cấp bởi Công ty Changsha Tianjiu - Trung Quốc. 30g bột được cân đo theo tỉ lệ mol Fe : 1Mn : 1Ni : 1Cr : 0,5Cu (Bảng 1). Với mục đích làm đồng đều hỗn hợp bột, hỗn hợp bột được trộn đều trong máy nghiền bi hành tinh với tỷ lệ bi : khối lượng bột (g) là 1:3, thời gian trộn 8 giờ, tốc độ quay 250 vòng/phút. Quá trình trộn khô và không sử dụng chất trợ nghiền (process control agent - PCA).

Bảng 1. Khối lượng từng loại bột kim loại trong 30 g bột tương ứng với công thức hợp kim FeMnNiCrCu_{0.5}

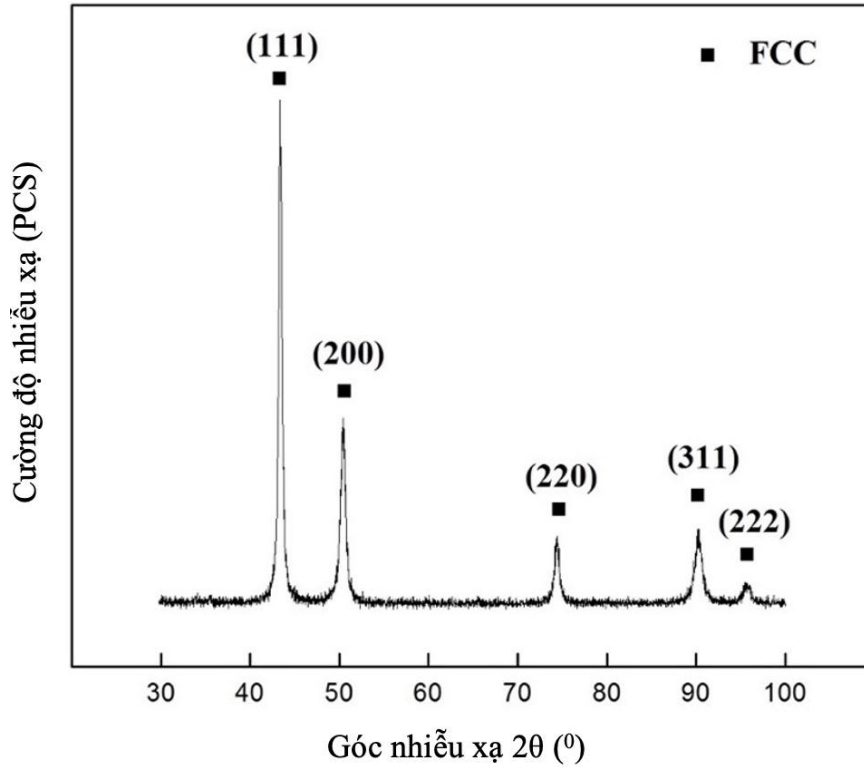
Nguyên tố	Fe	Mn	Ni	Cr	Cu
Khối lượng (g)	6,62	6,51	6,95	6,16	3,76

Hỗn hợp bột sau khi trộn được phủ 1 lớp với độ dày khoảng 1,2 mm trên bề mặt tấm đế. Lớp phủ đơn đường và đa đường được chế tạo trên thiết bị phun phủ laser YLR-1000-MM-WC, tham số công nghệ tối ưu được cho như sau: công suất laser $P = 800$ W, đường kính tia laser $D = 3$ mm, tốc độ quét $v = 8$ mm/s. Khí Ar được sử dụng để ngăn ngừa sự ôxi hoá trong quá trình phun phủ laser. Mẫu sử dụng để đánh giá tính chất điện hoá được chế tạo bằng cách quét laser đa đường, với độ chồng lấn giữa 2 đường kế nhau là 35%. Mẫu thu được sau khi phủ laser được cắt thành các mẫu nhỏ, kích thước 10×10 (mm) được mài, đánh bóng và tẩy thực để tiến hành kiểm tra tổ chức và tính chất.

Bề mặt mẫu của lớp phủ đa đường sau khi được mài và đánh bóng được sử dụng để phân tích thành phần pha bởi phương pháp nhiễu xạ tia X. Sử dụng thiết bị nhiễu xạ tia X XRD-6100 (SHIMADZU - Japan) với tia Cu-K α , điện áp 40 kV, dòng điện 30 mA, tốc độ quét 4°/phút, dải quét từ 30° đến 100°. Tổ chức tế vi được quan sát tại mặt cắt ngang của lớp phủ đơn đường bằng kính hiển vi điện tử quét SEM- FEI Quanta 250F (Japan) với phân tích phổ phân tán năng lượng EDS. Độ cứng tế vi của lớp phủ và vật liệu nền tấm thép C45 được đo trên máy đo độ cứng tế vi HVS-50. Tính chất điện hoá bề mặt lớp phủ đa đường được đánh giá bằng phương pháp đo đường cong phân cực trong dung dịch H₂SO₄ 0.5M trên thiết bị electrochemical workstation (Thales Zennium - Germany). Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm laser và kiểm tra vật liệu - Đại học Khoa học và Công nghệ Nam Kinh - Trung Quốc.

3. Kết quả và thảo luận

Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X được cho như trong hình 1. Kết hợp với phần mềm phân tích Jade6 có thể nhận thấy, xuất hiện các pic nhiễu xạ đặc trưng điển hình của pha FCC ở các góc nhiễu xạ 2θ : 43,38°; 50,42°; 74,42°; 90,16°; 95,05°; với thông số mạng $a = 3,570$ (Å). Thông số mạng được xác định dựa trên dữ liệu nhiễu xạ tia X và tính toán bằng định luật Bragg. Như vậy, đã thu được lớp phủ đơn pha FCC - hợp kim entropy cao FeMnNiCrCu_{0.5}, đây là kết quả thể hiện tính chất đặc trưng của HEA, tức hợp kim được cấu thành bởi nhiều nguyên tố khác nhau nhưng lại có khuynh hướng hình thành cấu trúc pha dung dịch rắn.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của lớp phủ hợp kim entropy cao FeMnNiCrCu_{0.5}.

Các nghiên cứu trước đây đã đưa ra các yếu tố như entropy trộn ΔS_{mix} , enthalpy trộn ΔH_{mix} , sự khác biệt về kích thước nguyên tử δ và nồng độ điện tử hóa trị VEC (valence electron concentration) có thể được dự đoán về sự hình thành dung dịch rắn trong HEA. Chúng được định nghĩa như sau bởi các phương trình (1)-(4) [19]:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n (c_i \ln c_i) \quad (1)$$

trong đó: R , c_i là hằng số khí và nồng độ nguyên tử của nguyên tố thứ i .

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n \Omega_{ij} c_i c_j \quad (2)$$

trong đó, $\Omega_{ij} = 4\Delta H_{AB}^{mix}$ với ΔH_{AB}^{mix} là nhiệt trộn của cặp 2 nguyên tố A-B [20].

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2} \quad (3)$$

trong đó, $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ với r_i là bán kính nguyên tố thứ i [19].

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i \quad (4)$$

trong đó, $(VEC)_i$ là nồng độ điện tử hoá trị của nguyên tố thứ i [21].

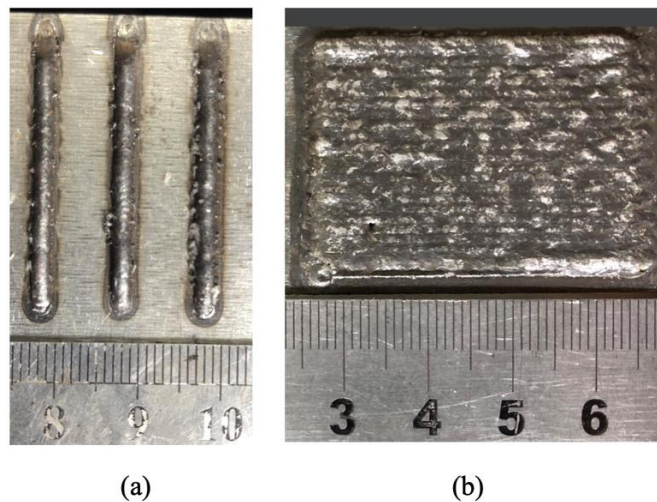
Guo và cộng sự [19] chỉ ra rằng khi các thông số nằm trong phạm vi sau: $11JK^{-1}mol^{-1} \leq \Delta S_{mix} \leq 19,5JK^{-1}mol^{-1}$, $-22kJmol^{-1} \leq \Delta H_{mix} \leq 7kJmol^{-1}$, và $0 \leq \delta \leq 8,5\%$, dung dịch rắn dễ dàng được hình thành. Cấu trúc pha trong HEA được dự đoán bởi giá trị nồng độ điện tử hoá trị VEC của nó [21]. Cụ thể, khi $VEC \geq 8,0$, hợp kim hình thành cấu trúc pha FCC. Khi $VEC < 6,87$, hợp kim hình thành pha BCC. Hỗn hợp pha FCC/BCC sẽ hình thành khi $6,87 \leq VEC < 8,0$.

Bảng 2. Các giá trị ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , VEC và δ của hợp kim FeMnNiCrCu_{0.5}

Hợp kim	ΔS_{mix} $JK^{-1}mol^{-1}$	ΔH_{mix} $kJmol^{-1}$	δ	VEC	Loại pha
FeMnNiCrCu _{0.5}	13,14	0,10	3,37	8,11	FCC

Bảng 2 liệt kê các giá trị ΔS_{mix} , ΔH_{mix} , VEC và δ của hợp kim entropy cao FeMnNiCrCu_{0.5}. Có thể thấy rằng các giá trị trên đều nằm trong tiêu chuẩn hình thành dung dịch rắn pha FCC đồng nhất.

Độ cứng của bề mặt lớp phủ thu được có giá trị khoảng 195 HV_{0.2}, giá trị này cao hơn so với độ cứng của vật liệu nền tấm thép C45 (186 HV_{0.2}). Điều này phù hợp với kết quả phân tích pha, lớp phủ chỉ có cấu trúc pha FCC là cấu trúc có độ cứng không cao.

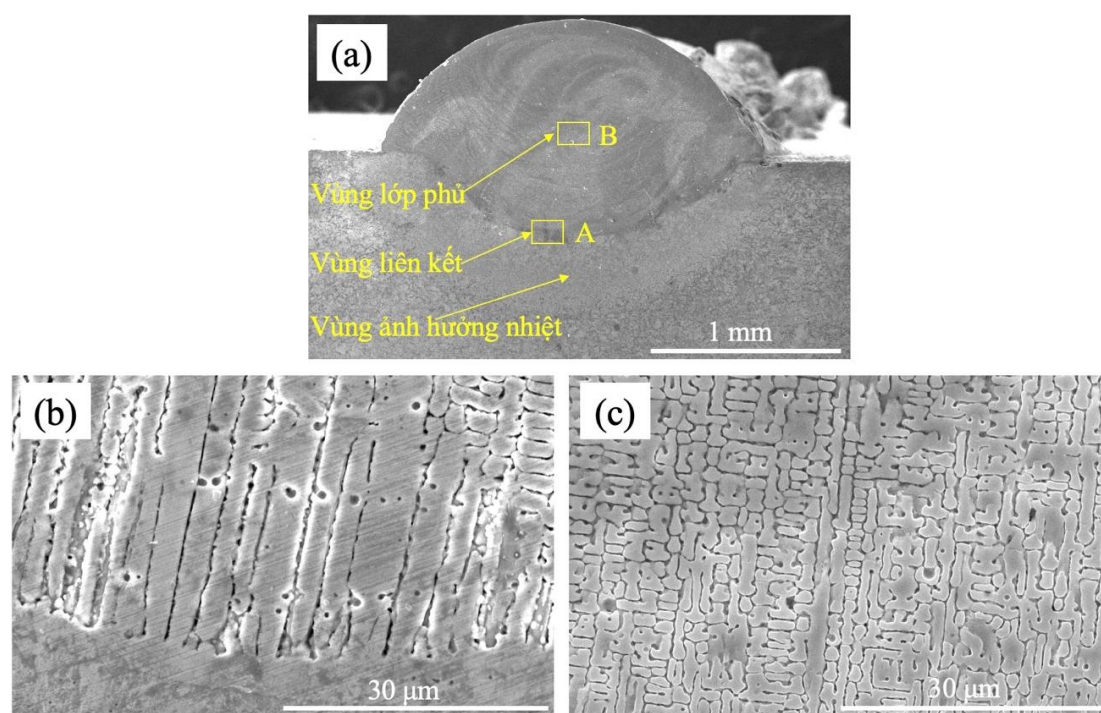


Hình 2. Hình thái bề mặt: a) Lớp phủ đơn đường; b) Lớp phủ đa đường.

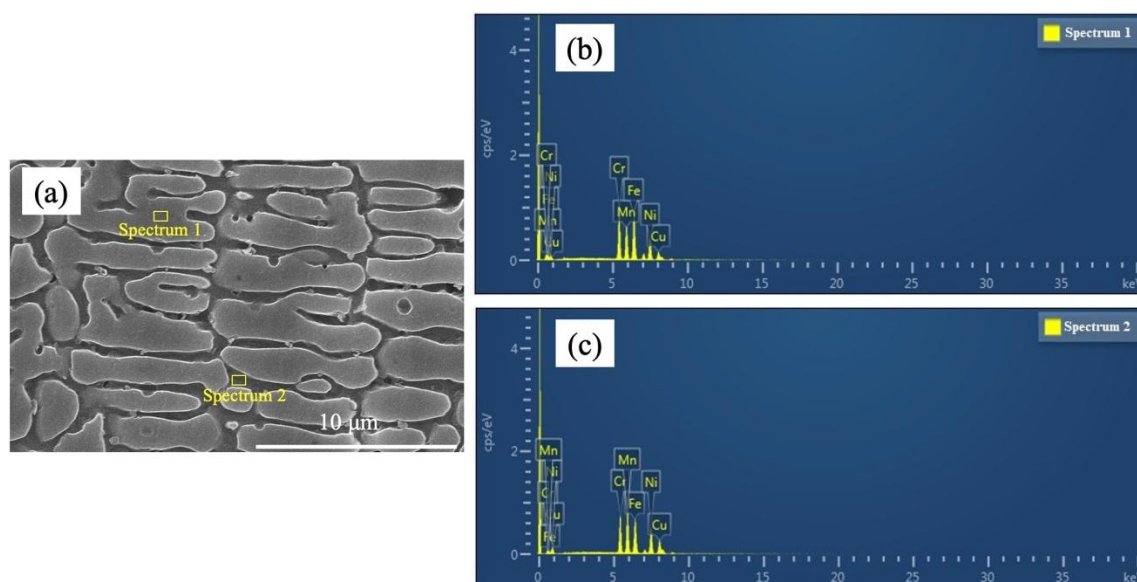
Hình thái thô đại bề mặt của lớp phủ đơn đường và đa đường thu được sau phun phủ laser được thể hiện trong hình 2. Có thể nhận thấy rằng với các thông số công nghệ đã được tối ưu, đường phủ có độ cao tương đối đồng đều, đảm bảo tính liên tục, bề mặt hoàn chỉnh, không có khuyết tật hay nứt gãy.

Tổ chức tế vi mặt cắt ngang lớp phủ đơn đường được thể hiện trong hình 3. Từ hình 3a có thể thấy rằng lớp phủ có hình dạng đường phủ điển hình với bề rộng khoảng 2 mm và độ cao tính từ bề mặt tấm đế khoảng 0,8 mm, được chia thành ba vùng rõ rệt là vùng lớp phủ, vùng liên kết và vùng ảnh hưởng nhiệt.

Tổ chức lớp phủ được cấu tạo chủ yếu bởi các hạt tinh thể hình trụ và đẳng trục, được thể hiện trong hình 3. Theo quy luật đông đặc, tổ chức tế vi phụ thuộc vào gradient nhiệt độ (G) và tốc độ phát triển tinh thể (R) [22]. Hình 3b thể hiện tổ chức vùng liên kết giữa lớp phủ và vật liệu tấm đế, tại đây tốc độ làm nguội nhanh, gradient nhiệt độ nên một mặt phẳng tinh thể nhỏ được hình thành. Tiếp đến là 1 vùng tinh thể có cấu trúc hình trụ được hình thành, có hướng vuông góc với bề mặt nền, sở dĩ như vậy vì khi vào sâu bên trong lớp phủ, gradient nhiệt độ giảm, các tinh thể phát triển ưu tiên theo hướng tản nhiệt nhanh nhất, cụ thể là hướng vuông góc với mặt phẳng nền. Đến vùng lớp phủ (Hình 3c), gradient nhiệt độ giảm nhanh, cấu trúc tinh thể nhánh cây được hình thành.



Hình 3. a) Ảnh SEM mặt cắt ngang lớp phủ đơn đường HEA FeMnNiCrCu_{0.5}; b) Ảnh độ phóng đại cao vùng liên kết A; c) Vùng lớp phủ B.



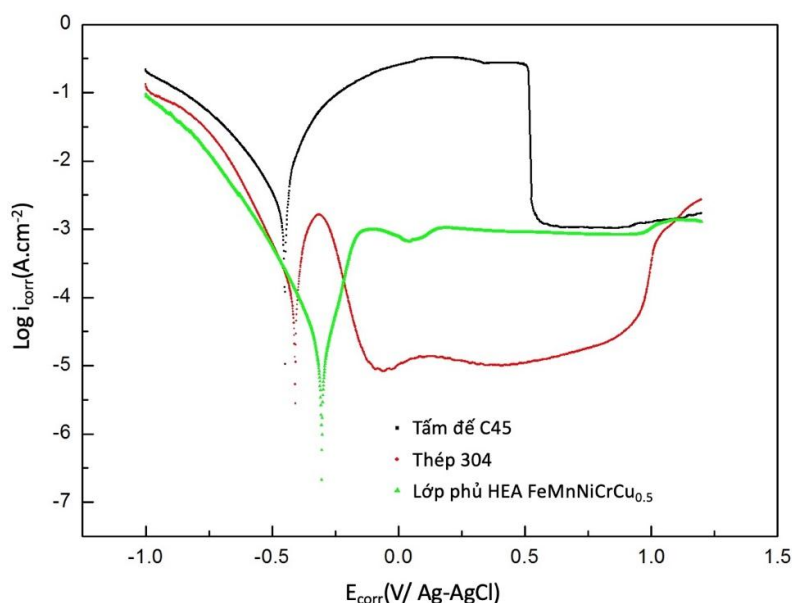
Hình 4. (a) Ảnh SEM; (b, c) Ảnh phổ nguyên tố EDS của các vùng khác nhau trong lớp phủ HEA FeMnNiCrCu_{0.5}.

Bảng 3. Thành phần hoá học các vùng khác nhau trong lớp phủ

Lớp phủ	Khu vực	Hàm lượng nguyên tố (at.%)				
		Fe	Mn	Ni	Cr	Cu
FeMnNiCrCu _{0.5}	Theo lý thuyết	22,22	22,22	22,22	22,22	11,11
	1	28,28	16,69	21,28	25,74	8,02
	2	21,68	23,64	22,43	19,33	12,91

Kết quả của phép phân tích thành phần hoá học tại các vùng khác nhau trong lớp phủ được thể hiện trong hình 4 và bảng 3. Sự phân bố các nguyên tố được phân tích tại vùng nội hạt (vùng 1) và biên hạt (vùng 2) và ảnh phổ EDS tương ứng chỉ ra trong hình 4b, 4c. Từ bảng 2 thấy rằng Cu và Mn có xu hướng thiên tích vào các vị trí biên hạt (vùng 2 - Hình 4c), trong khi đó tại vùng nội hạt (vùng 1 - Hình 4b) là nơi nguyên tố Fe và Cr chiếm hàm lượng cao, còn nguyên tố Ni phân bố tương đối đồng đều trong cả 2 vùng. Sự phân bố các nguyên tố chủ yếu bị ảnh hưởng bởi giá trị nhiệt trộn giữa các nguyên tố trong hợp kim [23]. Giá trị nhiệt trộn giữa Cu với Fe, Cr, Mn và Ni lần lượt là 13, 12, 4, 4 kJ/mol [20], Cr và Fe sẽ bị đẩy ra khỏi khu vực giàu Cu. Điều này là do giá trị nhiệt trộn giữa Cu-Cr, Cu-Fe là tương đối cao so với các nguyên tố khác. Hơn thế nữa, giá trị nhiệt trộn giữa Cu-Mn, Cu-Ni tương đối thấp do đó vùng giàu Cu hoà tan Mn và Ni nhiều hơn. Giá trị nhiệt trộn của Ni với Fe, Cr, Mn lần lượt là -2, -7 và -8 kJ/mol, do vậy Ni phân bố khá đồng đều trong hệ hợp kim này.

Tính chất điện hoá của lớp phủ được đánh giá trong dung dịch axit H_2SO_4 0.5M bằng phương pháp đo dòng Tafel. Mối quan hệ điện thế ăn mòn (E_{corr}) - mật độ dòng ăn mòn (I_{corr}) được cho như trong hình 5.



Hình 5. Đường cong phân cực của lớp phủ, thép 304 và tấm đế C45 trong môi trường H_2SO_4 0.5M.

Theo lý thuyết điện hoá với mật độ dòng ăn mòn I_{corr} nhỏ hơn, điện thế ăn mòn E_{corr} cao hơn sẽ thể hiện khả năng chống ăn mòn tốt hơn. Ngược lại, tính chống ăn mòn sẽ kém hơn [24]. Các thông số điện hoá được xác định bằng phương pháp ngoại suy Tafel (Bảng 4).

Bảng 4. Các thông số điện hoá của thép nền C45, 304 và lớp phủ HEA trong dung dịch H_2SO_4 0.5M

Mẫu	E_{corr} (mV)	I_{corr} (A.cm ⁻²)
Tấm đế C45	-450	$6,29 \times 10^{-3}$
Thép không gỉ 304	-410	$2,07 \times 10^{-4}$
Lớp phủ FeMnNiCrCu _{0.5}	-303	$1,67 \times 10^{-5}$

Từ kết quả có thể thấy, so với tấm đế C45 và thép không gỉ 304 thì lớp phủ FeMnNiCrCu_{0.5} HEA có giá trị điện thế ăn mòn E_{corr} cao nhất (-303 mV), mật độ dòng ăn mòn I_{corr} thấp nhất ($1,67 \times 10^{-5}$ A.cm⁻²). Điều này có thể sơ bộ kết luận rằng lớp phủ có khả năng chống ăn mòn tốt hơn so với thép không gỉ 304 và thép nền C45 trong dung dịch axit H_2SO_4 0.5M. Với hàm lượng Cr trong các pha cao hơn giới hạn thành phần gây ra sự thụ động (18% Cr), do đó dễ hình thành một lớp màng thụ động trên bề mặt lớp phủ HEA [25]. Điều này được cho là nguyên nhân chính tăng cường tính chống ăn mòn của lớp phủ này trong dung dịch axit H_2SO_4 0.5M.

4. Kết luận

Sử dụng công nghệ phủ laser, nhóm tác giả đã chế tạo thành công lớp phủ hợp kim entropy cao FeMnNiCrCu_{0.5}. Lớp phủ có tổ chức một pha FCC đồng nhất, độ cứng bề mặt lớp phủ khoảng 195 HV. Giữa lớp phủ và nền hình thành liên kết bền chặt, được chia ra các vùng rõ ràng như vùng lớp phủ, vùng liên kết, vùng ảnh hưởng nhiệt. Thông qua đo dòng ăn mòn trong môi trường axit H₂SO₄ cho thấy, lớp phủ có khả năng chịu ăn mòn tốt hơn thép nền và thép không gỉ. Điều này mang đến tiềm năng sử dụng lớp phủ HEA làm lớp phủ bảo vệ trong môi trường chịu ăn mòn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Chin, T.S., Shun, T.T., Tsau, C.H., & Chang, S.Y., "Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes," *Adv. Eng. Mater.*, 6, pp. 299-303, 2004.
- [2] Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., & Vincent, A. J. B., "Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, 375-377, pp. 213-218, 2004.
- [3] Senkov, O.N., Scott, J.M., Senkova, S.V., Miracle, D.B., & Woodward, C.F., "Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy," *J. Alloys Compd.*, 509, pp. 6043-6048, 2011.
- [4] Zhao, Y.J., Qiao, J.W., Ma, S.G., Gao, M.C., Yang, H.J., Chen, M.W., & Zhang, Y., "A hexagonal close-packed high-entropy alloy: The effect of entropy," *Mater. Des.*, 96, pp. 10-15, 2016.
- [5] Tian, F., Varga, L.K., Chen, N., Shen, J., & Vitos, L., "Empirical design of single phase high-entropy alloys with high hardness," *Intermetallics*, 58, pp. 1-6, 2015.
- [6] Varalakshmi, S., Kamaraj, M., & Murty, B.S., "Processing and properties of nanocrystalline CuNiCoZnAlTi high entropy alloys by mechanical alloying," *Mater. Sci. Eng. A*, 527, pp. 1027-1035, 2010.
- [7] Peng, Y.B., Zhang, W., Li, T.C., Zhang, M.Y., Wang, L., & Hu, S.H., "Microstructures and wear-resistance of WC-reinforced high entropy alloy composite coatings by plasma cladding: effect of WC morphology," *Surf. Eng.*, 37, pp. 678-687, 2021.
- [8] Qiu, X.W., Zhang, Y.P., He, L., & Liu, C.G., "Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy," *J. Alloys Compd.*, 549, pp. 195-199, 2013.
- [9] Dou, D., Li, X.C., Zheng, Z.Y., & Li, J.C., "Coatings of FeAlCoCuNiV high entropy alloy," *Surf. Eng.*, 32, pp. 766-770, 2016.
- [10] Xiao, J.K., Li, T.T., Wu, Y.Q., Chen, J., & Zhang, C., "Microstructure and tribological properties of plasma-sprayed CoCrFeNi-based high-entropy alloy coatings under dry and oil-lubricated sliding conditions," *J. Therm. Spray. Technol.*, 30, pp. 926-936, 2021.

- [11] Wang, Z.Z., Ma, L., Han, B., Huang, G.S., Cao, Q., & Sun, M.X., "Influence of parameters on the cold spraying FeCoCrMoBCY amorphous coatings," *Surf. Eng.*, 37, pp. 545-557, 2021.
- [12] Cheng, K.H., Lai, C.H., Lin, S.J., & Yeh, J.W., "Structural and mechanical properties of multi-element (AlCrMoTaTiZr) N_x coatings by reactive magnetron sputtering," *Thin Solid Films*, 519, pp. 3185-3190, 2011.
- [13] Guo, Y.X., Liu, Q.B., & Zhou, F., "Microstructure and properties of Fe₅Cr₅SiTiCoNbMoW coating by laser cladding," *Surf. Eng.*, 34, pp. 283-288, 2018.
- [14] Jiang, L., Wu, W., Cao, Z.Q., Deng, D.W., & Li, T., "Microstructure evolution and wear behavior of the laser clad CoFeNi₂V_{0.5}Nb_{0.75} and CoFeNi₂V_{0.5}Nb high-entropy alloy coatings," *J. Therm. Spray. Technol.*, 25, pp. 806-814, 2016.
- [15] Ye, X.Y., Ma, M.X., Cao, Y.X., Liu, W.J., Ye, X.H., & Gu, Y., "The Property Research on High-entropy Alloy Al_xFeCoNiCuCr Coating by Laser Cladding," *Phys. Proc.*, 12, pp. 303-312, 2011.
- [16] Shi, Y., Ni, C., Liu, J., & Huang, G.Z., "Microstructure and properties of laser clad high-entropy alloy coating on aluminium," *Mater. Sci. Technol.*, 34, pp. 1239-1245, 2018.
- [17] Ye, Y.F., Wang, Q., Zhao, Y.L., He, Q.F., Lu, J., & Yang, Y., "Elemental segregation in solid solution high-entropy alloys: Experiments and modeling," *J. Alloys Compd.*, 681, pp. 167-174, 2016.
- [18] Ni, C., Shi, Y., Liu, J., & Huang, G.Z., "Characterization of Al_{0.5}FeCu_{0.7}NiCoCr high-entropy alloy coating on aluminum alloy by laser cladding," *Opt. Las. Tech.*, 105, pp. 257-263, 2018.
- [19] Guo, S., & Liu, C.T., "Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, 21, pp. 433-446, 2011.
- [20] Takeuchi, A., & Inoue, A., "Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element," *Mater. Trans.*, 46, pp. 2817-2829, 2005.
- [21] Guo, S., Ng, C., Lu, J., & Liu, C.T., "Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys," *J. Appl. Phys.*, 109, 2011.
- [22] Rutter, J. W., & Chalmers, B., "A prismatic substructure formed during solidification of metals," *Can. J. Phys.*, 31, pp. 15-39, 1953.
- [23] Hsu, U.S., Hung, U.D., Yeh, J.W., Chen, S.K., Huang, Y.S., & Yang, C.C., "Alloying behavior of iron, gold and silver in AlCoCrCuNi-based equimolar high-entropy alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, 460-461, pp. 403-408, 2007.
- [24] Qiu, Y., Thomas, S., Gibson, M.A., Fraser, H.L., Bilis, N., "Corrosion of high entropy alloys," *npj Mater. Degrad.*, 15, 2017.
- [25] Qiu, X.W., Zhang, Y.P., He, L., Liu, C.G., "Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy," *J. Alloys Compd.*, 549, pp. 195-199, 2013.

MICROSTRUCTURES AND PROPERTIES OF THE HIGH-ENTROPY ALLOY COATING FABRICATED BY LASER CLADDING

Abstract: *FeMnNiCrCu_{0.5} high-entropy alloy (HEA) coating was prepared on the C45 steel by laser cladding. Constituent phase, microstructure and chemical composition of the coating was investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS), respectively. The microhardness and corrosion resistance of the coating are also studied. Results showed that the HEA coating reveals a good metallurgical bonding to the substrate, and they consist of the heat-affected zone, bonding zone and cladding zone. The microstructure of the coating showed a typical dendrite crystal growing from the substrate. FeMnNiCrCu_{0.5} coating was composed a single face-center cubic (FCC) phase, and the surface hardness of the coating is 195 HV_{0.2}. In 0.5M H₂SO₄ solution, the coating has better corrosion resistance than the substrate, which allows the HEA coating to be used as an anti-corrosion coating in engineering applications.*

Keywords: High-entropy alloy coating; laser cladding; microstructure; corrosion resistance.

Nhận bài: 25/11/2021; Hoàn thiện sau phản biện: 23/02/2022; Chấp nhận đăng: 14/04/2022

