

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO LỚP PHỦ CÓ ĐỘ CỨNG CAO VÀ CHỐNG ĂN MÒN LÊN HỢP KIM D16 BẰNG PHƯƠNG PHÁP OXI HÓA ĐIỆN PHÂN PLASMA

PHAN VĂN TRƯỜNG ⁽¹⁾, NGUYỄN VĂN THÀNH ⁽¹⁾, ĐỖ MINH HIẾU ⁽¹⁾

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhôm và các hợp kim của nó là vật liệu rất quan trọng cho các ngành công nghiệp chế tạo máy bay, tên lửa cũng như các trang thiết bị quân sự khác [1]. Trong không khí nhôm và các hợp kim của nó được bảo vệ bởi lớp màng oxit nhôm, độ dày của lớp màng oxit $0,005 \div 0,2 \mu\text{m}$. Lớp màng này làm tăng độ bền hoá học của nhôm nhưng không thể đảm bảo bảo vệ chống ăn mòn của nhôm. Khi khai thác sử dụng trong điều kiện khí hậu ẩm hoặc khí hậu biển thì lớp màng này bị phá huỷ và hình thành lớp sản phẩm ăn mòn màu trắng [2].

Việt Nam là nước nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới nóng ẩm đặc trưng bởi nhiệt độ và độ ẩm cao. Nhiệt độ mùa hè có những thời điểm $37 \div 41^\circ\text{C}$; lượng mưa hàng năm cao từ 1500-3000 mm; độ ẩm tương đối trong không khí cao, dao động từ 80-100%, bờ biển trải dài từ bắc vào nam nên hàm lượng muối trong không khí ở các vùng hải đảo và bờ biển luôn rất cao. Các kết quả nghiên cứu [3, 4] chỉ ra các vùng khí hậu biển đảo có mức độ ăn mòn từ C4÷C5 theo phân mức ăn mòn ISO 9223. Đây là những yếu tố ảnh hưởng đến độ bền vật liệu, gây ăn mòn vật liệu, đặc biệt là các chi tiết được làm từ nhôm và các hợp kim của nhôm.

Để tăng độ cứng và độ chịu mài mòn cho các hợp kim của nhôm hiện nay người ta sử dụng phương pháp oxi hóa điện phân plasma (plasma electrolytic oxidation - PEO). Bằng phương pháp này người ta tạo ra được lớp phủ có độ cứng và độ chịu mài mòn cao, làm tăng cơ lý của hợp kim nhôm [5]. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến tính chất của lớp phủ. Thành phần và nồng độ của dung dịch điện phân đóng một vai trò quan trọng trong việc thay đổi cấu trúc, hình thái, khả năng chống mài mòn và ăn mòn của lớp phủ là một trong số các yếu tố đó. Một số lượng lớn các công trình về lớp phủ PEO đã được nghiên cứu và công bố. Các nghiên cứu [6, 7, 8] đã thu được các lớp phủ lên hợp kim nhôm trong dung dịch điện phân silicat-kiểm ở điều kiện nồng độ và thành phần dung dịch điện phân khác nhau và chế độ công nghệ là $i_a/i_k = 1$. Các nghiên cứu [9, 10, 11] cũng đã thu được lớp phủ lên hợp kim nhôm bằng cách cho thêm vào dung dịch điện phân silicat-kiểm các hợp chất của mangan và coban, các lớp phủ thu được có tính trang trí và tính chất tốt hơn so với lớp phủ thu được từ dung dịch điện phân cơ sở silicat-kiểm. Tuy nhiên các lớp phủ thu được có độ dày thấp ($20 \div 30 \mu\text{m}$), trong cấu trúc tế vi còn nhiều lỗ nhỏ và xốp điều này dẫn đến lớp phủ có độ cứng, độ chịu mài mòn và chống ăn mòn chưa cao. Các công trình nghiên cứu trên hiện chỉ thêm một chất vào trong dung dịch điện phân cơ sở, việc thêm vào trong dung dịch điện phân cơ sở từ 2 đến 3 chất để tăng tính chất của lớp phủ hiện chưa được nghiên cứu nhiều.

Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu chế tạo lớp phủ trên nền hợp kim nhôm D16 bằng phương pháp oxi hóa điện phân plasma có độ cứng và khả năng chống ăn mòn cao.

2. QUY TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Hợp kim nhôm D16 do Liên bang Nga sản xuất có độ dày 3mm được cắt thành các mẫu thử với kích thước 40 mm x 50 mm x 3 mm. Thành phần hóa học của nó được liệt kê trong bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim nhôm D16 (% khối lượng).

Tên nguyên tố	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Si	Zn	Al
Hàm lượng	3,85	1,39	0,65	0,11	0,049	0,068	0,054	còn lại

2.2. Chuẩn bị lớp phủ

Phương pháp phủ bằng PEO được thực hiện trên thiết bị điện phân sử dụng nguồn điện AC, mật độ dòng điện 15 A/dm^2 , tần số 50 Hz và tỷ lệ mật độ dòng điện $i_a/i_k = 1,0$. Các mẫu hợp kim nhôm D16 được nối với anod. Bề điện phân được nối với catod, bề điện phân được làm bằng thép không gỉ và được làm mát bằng nước. Thời gian tiến hành điện phân 1,5 giờ. Dung dịch điện phân silicat-kiềm cơ sở M-1 được điều chế bằng cách sử dụng thủy tinh lỏng $\text{Na}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_n$, modul: 2,85 (12 g/L), NaOH (2 g/L); Dung dịch M-2 là dung dịch điện phân cơ sở bổ sung thêm $\text{Co}(\text{OH})_2$ (2 g/L) và V_2O_5 (2g/L) (bảng 2). Các mẫu được phủ được ký hiệu là M-1, M-2. Nhiệt độ của chất điện phân được giữ dưới 35°C để tránh những ảnh hưởng bất lợi có thể xảy ra đối với quá trình PEO và sự hình thành của các lớp phủ. Sau khi xử lý PEO, các mẫu được rửa dưới dòng nước chảy và sau đó làm khô bằng luồng không khí ấm.

Bảng 2. Các dung dịch điện phân được sử dụng để hình thành các lớp phủ PEO

Mẫu	Dung dịch điện phân
M-1	$\text{Na}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_n$ modul: 2,85 (12 g/L), NaOH (2 g/L),
M-2	dung dịch điện phân cơ sở + $\text{Co}(\text{OH})_2$ (2 g/L) + V_2O_5 (2 g/L)

2.3. Xác định các đặc tính của lớp phủ

Độ dày của các lớp phủ được đo bằng máy đo độ dày (Thiết bị Positector 6000 FNS1, DeFelsko, USA). Đo ngẫu nhiên 10 điểm trên hai mặt của mẫu. Giá trị trung bình của độ dày được tính toán để đại diện cho độ dày của lớp phủ.

Độ cứng tế vi của lớp phủ được đo bằng phương pháp Viker trên thiết bị IndentaMet 1106 (hãng Buehler, Mỹ) theo tiêu chuẩn ASTM E384 - 17: 2011.

Thiết bị kính hiển vi điện tử quét (Hitachi TM4000P II, Nhật Bản) với hệ thống phổ tán sắc năng lượng (EDS-quantax 75, Bruker Nano GmbH, Germany) đã được sử dụng để phân tích vi cấu trúc, bao gồm hình thái bề mặt và mặt cắt của lớp phủ, và các thành phần nguyên tố của lớp phủ. Thành phần pha của lớp phủ được khảo sát bằng máy đo nhiễu xạ Siemens (Siemens, Munich, Đức) hoạt động ở 40 kV và 40 mA với bức xạ Cu K α (bước sóng $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). 2θ dao động từ 10° đến 80° sử dụng tốc độ quét $0,02^\circ/\text{phút}$.

Xác định hệ số ma sát: Hệ số ma sát của lớp phủ được xác định bằng thiết bị tribometer nhiệt độ cao theo phương pháp “quả cầu trên đĩa”. Tải trọng 5 N, tốc độ chuyển động thẳng của đĩa là 5 cm/giây. Lực ma sát được tính sau mỗi chu kỳ 5 phút kể từ khi bắt đầu thử nghiệm. Thử nghiệm kết thúc khi lực ma sát không đổi, nhưng không ít hơn (25±5) phút. Kết quả đo là giá trị trung bình cộng của ba mẫu.

Xác định độ nhám bề mặt lớp phủ: Độ nhám bề mặt lớp phủ (Rz) được thực hiện bằng máy đo biên dạng tiếp xúc theo GOST 19300 với sai số phép đo không quá ± 10 %. Kết quả đo là giá trị trung bình số học của ba lần đo.

Chuẩn bị mặt cắt của lớp phủ:

- Mẫu được cắt bằng thiết bị cắt mẫu kim tương CUTLAM® micro 1.1 (Lam plan, Pháp). Mẫu cắt có kích thước 10 x 10 mm.

- Đúc mẫu: Mẫu lớp phủ được tiến hành đúc mẫu nóng bằng thiết bị Máy đúc mẫu tự động PRESSLAM 1.1 (Lam plan, Pháp), sử dụng bột phenolic để đúc mẫu.

- Mài mẫu được tiến hành trên thiết bị mài mẫu kim tương SMARTLAM®2.0 (Lam plan, Pháp). Sau đó mẫu được đánh bóng và chuẩn bị bằng chùm tia ion trên thiết bị Arblade 5000 (Hitachi, Nhật bản).

2.4. Xác định đường cong phân cực theo phương pháp thế tĩnh

Đo đường cong phân cực theo phương pháp thế tĩnh (Potentiostatic) được thực hiện bằng thiết bị Autolab Metrohm PGSTAT302N (hãng Metrohm AG, Thụy Sĩ) trong dung dịch NaCl 5% ở nhiệt độ phòng để đánh giá khả năng chống ăn mòn của các lớp phủ. Các phép đo được thực hiện trong một tế bào ba điện cực bao gồm một điện cực so sánh Ag/AgCl bão hòa KCl), một điện cực đối platin và điện cực làm việc là các mẫu nghiên cứu. Diện tích bề mặt của mẫu tiếp xúc với dung dịch ăn mòn là 1 cm². Khoảng điện thế quét từ -0,2V đến +0,2V tính theo điện cực so sánh RE, sau thời gian ngâm 2 giờ, bước thế quét là 2 mV/s. Dữ liệu đường cong phân cực được xử lý bằng phần mềm NOVA 2.1. Dựa vào đường cong phân cực và phương pháp ngoại suy Tafel, có thể xác định được tốc độ ăn mòn của mẫu.

2.5. Xác định độ chịu mài mòn của lớp phủ

Khả năng chịu mài mòn của các lớp phủ được đánh giá bằng thiết bị Taber model 5155 (hãng Taber, Mỹ), sử dụng bánh mài CS-17 dùng cho lớp phủ anod hóa hợp kim nhôm. Tải trọng mòn là 9,8 N, tốc độ quay là 60 vòng/phút. Tổng số vòng quay là 7000÷13000 vòng.

Khả năng chịu mài mòn của lớp phủ theo phương pháp Taber T, mg trên 1000 vòng được tính theo công thức:

$$T = \frac{m_2 - m_1}{n} \cdot 1000$$

Trong đó: m_1 - khối lượng mẫu trước khi thử nghiệm, mg;

m_2 - khối lượng mẫu sau khi thử nghiệm, mg;

1000 - số lượng vòng quay chuẩn theo Taber;

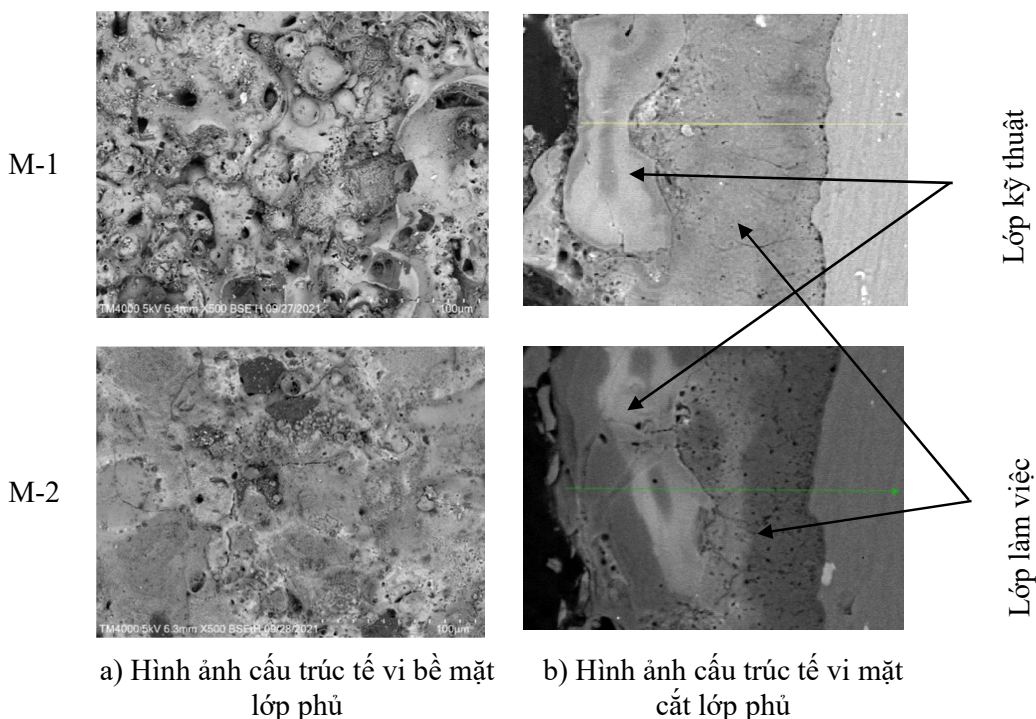
n - số lượng vòng quay thực tế.

Kết quả thử nghiệm là giá trị trung bình của ba mẫu. Giá trị thu được được làm tròn đến 3 số thập phân.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính của lớp phủ

Quá trình oxi hóa điện phân plasma được thực hiện trong thời gian 90 phút. Độ dày của lớp phủ trung bình $60 \div 65 \mu\text{m}$. Hình ảnh tế vi bề mặt và mặt cắt lớp phủ được đưa ra ở hình 1.



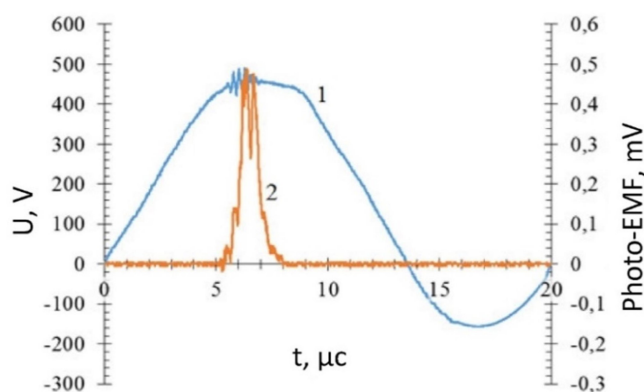
Hình 1. Hình ảnh cấu trúc tế vi bề mặt lớp phủ

Qua hình ảnh tế vi và hình ảnh mặt cắt của lớp phủ ta nhìn thấy lớp phủ mẫu M-2 có bề mặt nhẵn hơn, phẳng hơn và ít lỗ rỗng hơn mẫu M-1. Điều này là do hiện tượng sa lắng các hidrat hoá của $\text{Co}(\text{OH})_2$ và V_2O_5 hoặc VO_3^- lên trên bề mặt lớp phủ tại các vị trí có lỗ rỗng mà tại đó xảy ra sự phóng điện plasma [12], điều này phù hợp với kết quả đo hệ số ma sát và độ nhám bề mặt được đưa ra ở bảng 3. Ngoài ra theo hình 1 ta thấy lớp phủ thu được có hai lớp gồm lớp kỹ thuật bên ngoài và lớp làm việc bên trong. Sự phân bố lớp phủ như vậy là vì khi hình thành lớp phủ sẽ phân chia thành các ranh giới “lớp phủ oxit - kim loại nền” và “lớp phủ oxit - dung dịch điện phân”. Phần phía trong tại các vị trí phóng điện plasma các ion, anion, oxit kim loại tồn tại ở trạng thái nóng chảy và plasma kèm theo các bóng khí thoát ra trong quá trình điện phân plasma, còn phần phía tiếp giáp với dung dịch điện phân thì được làm lạnh bởi dung dịch. Ngoài ra, còn có hiện tượng “sa lắng” của các anion/polianion và các phân tử bị hidrat hoá lên bề mặt của lớp phủ nên phần phía ngoài sẽ dày đặc hơn [7, 8].

Bảng 3. Hệ số ma sát và độ nhám bề mặt của lớp phủ

STT	Mẫu	Hệ số ma sát	Độ nhám bề mặt Rz, μm
1	M-1	$0,365 \pm 0,018$	$30,194 \pm 2,135$
2	M-2	$0,326 \pm 0,012$	$25,705 \pm 1,835$

Nguyên nhân của hiện tượng tạo các lỗ rỗng này là do quá trình điện phân plasma hợp kim nhôm trong dung dịch silicat - kiềm sử dụng dòng điện AC, hiện tượng phóng điện plasma chỉ diễn ở chu kỳ anod (hình 2) [13]. Độ bám dính và độ xốp của lớp phủ chịu ảnh hưởng lớn bởi lượng khí thoát ra do các phản ứng xảy ra ở anod và cathod.



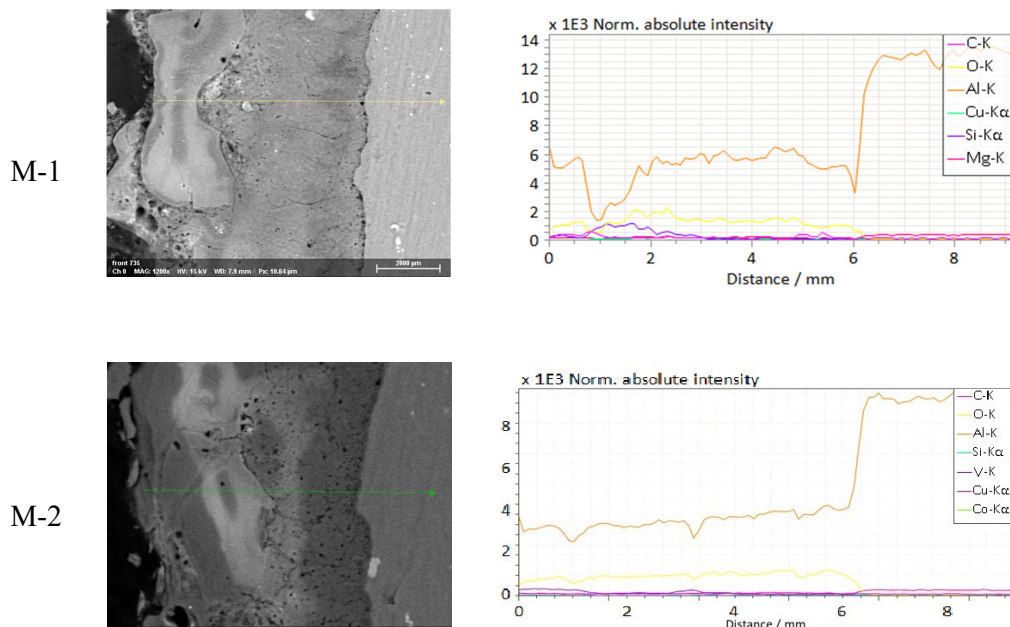
Hình 2. Giá trị thế điện động đo được khi điện phân plasma hợp kim nhôm trong dung dịch silicat-kiềm (photo-EMF method)

Ở nửa chu kỳ đầu khi mẫu D16 cần phủ đóng vai trò là anod thì diễn ra các phản ứng (1, 2) còn ở nửa chu kỳ sau mẫu D16 đóng vai trò là cathod diễn ra các phản ứng (3).



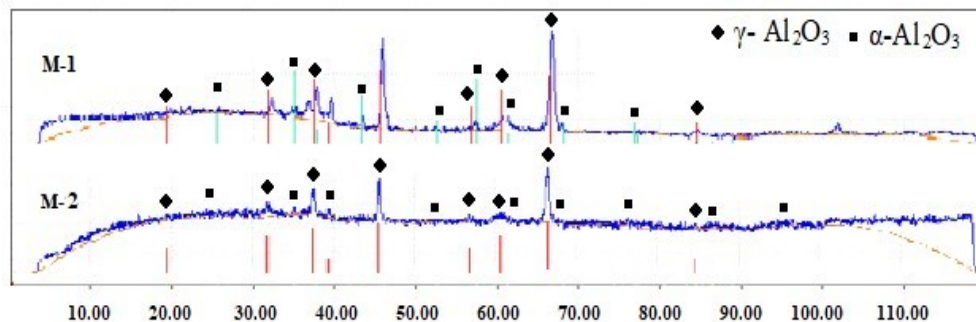
Sự phân bố các nguyên tố trong thành phần lớp phủ được thực hiện bởi kính hiển vi điện tử quét với hệ thống phổ tán sắc năng lượng. Từ hình 3 ta thấy các nguyên tố có trong thành phần của dung dịch điện phân và hợp kim đều có mặt trong thành phần của lớp phủ. Hình ảnh đồ thị phân bố các nguyên tố trong lớp phủ ta thấy có các nguyên tố nhôm và đồng. Các oxit nhôm và đồng được hình thành do quá trình hoà tan và oxi hoá lớp nhôm trên bề mặt của mẫu theo cơ chế như ở phản ứng trên. Các oxit nhôm và đồng phân bố đều trong lớp phủ là do hiện tượng điện di và khuếch tán theo chiều dọc các lỗ trên lớp phủ khi mới hình thành ở trạng thái plasma. Khi trạng thái plasma ra đến bề mặt ngoài tiếp xúc với dung dịch điện ly và được làm nguội nhanh chóng và hình thành nên oxit nhôm và đồng [14÷17].

Khi phủ bằng phương pháp điện phân plasma trong dung dịch silicat-kiềm ta thấy ngoài nhôm và đồng còn có nguyên tố Si, Co, V ở dạng oxit. Nguyên nhân của hiện tượng này là do xảy ra hiện tượng “sa lắng” các polyanion $n(\text{Si}_x\text{O}_y)^{m-}$, các hidrat $\text{Co}(\text{OH})_2$ và V_2O_5 hoặc VO_3^- lên trên bề mặt lớp phủ và tại đây xảy ra các quá trình phản ứng và oxi hoá [14, 16, 17].



Hình 3. Sơ đồ phân bố nguyên tố hoá học trong thành phần của lớp phủ

Như chúng ta đã biết Al_2O_3 tồn tại ở vài dạng pha tinh thể khác nhau, trong đó pha có độ cứng cao nhất là dạng $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Tiến hành chụp phổ X-rays của lớp phủ để xác định hàm lượng $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ và $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Qua hình 4 ta nhận thấy trong thành phần của lớp phủ xuất hiện các pha oxit nhôm $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ và $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Sự xuất hiện của các pha này trong thành phần lớp phủ là do các oxit nhôm được hình thành ở trạng thái plasma, được làm nguội nhờ dung dịch điện phân [18].



Hình 4. Phổ X-Rays oxit nhôm trong lớp phủ

Tiến hành đo độ cứng tế vi và xác định khả năng chịu mài mòn của lớp phủ. Từ bảng 4 và 5 ta nhận thấy hợp kim D16 cũng có độ cứng khá cao, chịu mài mòn tương đối tốt, tuy nhiên khi hình thành lớp phủ bằng phương pháp điện phân plasma trong dung dịch kiềm-silicat thì thu được lớp phủ có độ cứng cao hơn nhiều lần (từ 7,3 đến 7,9 lần) và khả năng chịu mài mòn tăng lên từ 4,9 đến 7,2 lần. Điều này là do trong lớp phủ có lượng lớn là các oxit nhôm và silic. Khi có mặt trong dung dịch điện phân Co(OH)_2 và V_2O_5 , diễn ra sự “lắng đọng” $n(\text{Si}_x\text{O}_y)^{m-}$, các hidrat Co(OH)_2 và V_2O_5 hoặc VO_3^- làm cho bề mặt của lớp phủ dày đặc hơn dẫn đến sự thoát nhiệt của lớp phủ kém hơn, do đó sự chuyển pha của oxit nhôm thành $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ được nhiều hơn (hình 4). Ngoài ra khi thêm V_2O_5 và Co(OH)_2 vào dung dịch điện phân thì Co(OH)_2 lắng đọng lên bề mặt điện cực sẽ tạo thành CoO diễn ra theo phản ứng (4), sau đó CoO tương tác với các oxit nhôm và silic (phản ứng nhiệt hoá) theo phản ứng 5, 6. Còn V_2O_5 diễn ra các phản ứng 7, 8, 9.



Sự có mặt của các hợp chất này làm thay đổi hình thái bề mặt lớp phủ. Hình thái lớp phủ có dạng “nóng chảy” hơn so với hình thái bề mặt lớp phủ thu được khi ở cùng điều kiện nhưng trong dung dịch điện phân không có hidroxit coban và oxit vanadi. Sự nóng chảy và thiêu kết CoO , V_2O_3 với SiO_2 và Al_2O_3 diễn ra khi nhiệt độ 900 và 1000°C tương ứng tạo thành các silicat và aluminat của Co và V làm cho lớp phủ có độ cứng và chịu mài mòn tốt hơn [16, 17, 18].

Bảng 4. Độ cứng tế vi của hợp kim D16 và lớp phủ trên nền hợp kim D16

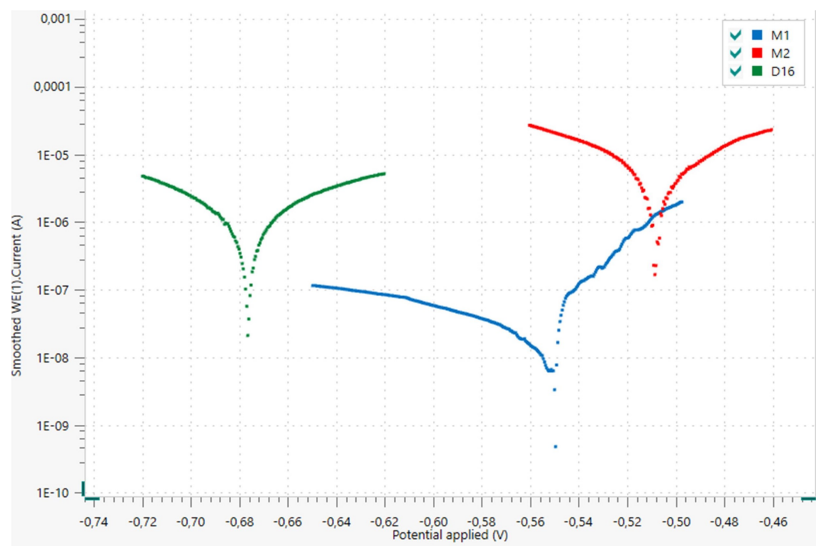
STT	Lần đo	Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Lần 5	Giá trị TB (HV0.2)
1	D16	124,2	136,1	127,2	130,8	127,0	129,06
2	M-1	904,5	1022,0	955,7	985,5	889,7	951,48
3	M-2	987,3	986,1	1022,0	1055,0	1060,0	1022,22

Bảng 5. Kết quả khảo sát khả năng chịu mài mòn của lớp phủ

Ký hiệu mẫu	Kết quả thử nghiệm (mg)
D16	$32,536 \pm 1,925$
M-1	$6,663 \pm 0,626$
M-2	$4,527 \pm 0,419$

3.2. Xác định khả năng chống ăn mòn của lớp phủ

Đường cong phân cực và giá trị E_{corr} , i_{corr} ... của hợp kim D16 và các mẫu phủ M-1 và M-2 trong dung dịch NaCl 5% được đưa ra ở hình 5 và bảng 6.



Hình 5. Đường cong phân cực các mẫu theo phương pháp điện thế tĩnh

Từ các giá trị tốc độ ăn mòn của hợp kim D16 và lớp phủ ta suy ra được khả năng bảo vệ chống ăn mòn của lớp phủ và hiệu quả bảo vệ của lớp phủ so với hợp kim D16 không được phủ. Từ hình 5 đồ thị giá trị đường cong phân cực theo phương pháp điện thế tĩnh và bảng 6 về giá trị thế ăn mòn, dòng ăn mòn và tốc độ ăn mòn ta ngoại suy được hiệu suất bảo vệ của lớp phủ. Với các mẫu đã được phủ bằng phương pháp oxi hoá điện phân plasma hiệu suất bảo vệ chống ăn mòn từ 89,64 (M-1) đến 94,03 % (M-2) cho hợp kim D16 [19, 20]. Kết quả này gợi ý rằng lớp phủ có khả năng chống ăn mòn tốt.

Bảng 6. Giá trị thế ăn mòn, dòng ăn mòn và tốc độ ăn mòn các mẫu thử

Tên mẫu	ba V/dec	bc V/dec	E_{corr} V	i_{corr} $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Rpr Ω	Tốc độ ăn mòn mm/năm	Hiệu suất bảo vệ, %
D16	0,76358	0,26588	-0,67626	1,3306	7 404	0,2260	-
M-1	0,03025	0,08834	-0,54919	0,0230	42 504	0,0234	89,64
M-2	0,03442	0,05010	-0,50767	7,1809	57 646	0,0135	94,03

4. KẾT LUẬN

- Chế tạo thành công lớp phủ lên hợp kim D16 bằng phương pháp oxi hoá điện phân plasma từ dung dịch điện phân silicat-kiềm có độ cứng cao và khả năng chịu ăn mòn tốt. Độ cứng tăng lên 7,3 lần còn hiệu suất bảo vệ chống ăn mòn đạt trên 89,64 % so với hợp kim D16.

- Bằng việc thêm vào trong dung dịch điện phân silicat-kiềm $\text{Co}(\text{OH})_2$ và V_2O_5 thu được lớp phủ có độ cứng và khả năng chống ăn mòn cao hơn. Độ cứng và hiệu suất bảo vệ chống ăn mòn tăng lên lần lượt là 7,9 lần và 94,03%.

- Từ kết quả trên cho thấy khả năng ứng dụng công nghệ này vào việc chế tạo các chi tiết máy móc, trang thiết bị bằng hợp kim nhôm thay thế sắt thép, hợp kim titan sử dụng ở điều kiện khí hậu Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nicolescu A., Fisher J. W., Haq M. A., Bailey T. F., Lazarev A., *Drilling intervention-milling and fishing of high strength aluminum drill pipe*, In Proceedings of the North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt, 14-17 February 2012.
2. В. В. Герасимов, *Коррозия алюминия и его сплавов*, Издательство «Металлургия», Москва, 1967.
3. Karpov V. A., Ivonhin V. N., Chữ Minh Tiến, Mikhailova O. L., Covaltruc Iu. L., Philitrev N. L., Nguyễn Quang Tân, *Xác định tính ăn mòn khí quyển tại các Trạm Thử nghiệm khí hậu của Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt đới, 6/2013, **3**:77-83.
4. Hà Hữu Sơn, Chữ Minh Tiến, Nguyễn Văn Vinh, Phạm Duy Nam, *Xác định tính ăn mòn khí quyển tại một số vùng miền ở Việt Nam*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt đới, 3/2014, **6**:73-81.
5. Lee K. M., Ko Y. G., Shin D. H., *Incorporation of carbon nanotubes into micro-coatings film formed on aluminum alloy via plasma electrolytic oxidation*, Matter. Lett., 2011, **65**:2269-2273.
6. Arrabal R., Mohedano M., Matykina E., Pardo A., Mingo B., Merino M. C., *Characterization and wear behavior of PEO coatings on 6082-T6 aluminum alloy with incorporated $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles*, Surf. Coat. Technol., 2015, **269**:64-73.
7. Alexander Sobolev, Alexey Kossenko, Michael Zinigrad, Konstantin Borodianskiy, *Creation of oxide coating on Al 1050 alloy*, Proceedings of the tenth international conference on material technologies and modeling MMT-2018, Ariel, Israel, 2018, p.158-164.
8. V. M. Posuvailo, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina, I. V. Koval'chuck, M. M. Student, B. D. Vasylyv, *The effect of electrolyte composition on the plasma electrolyte oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy*, Archives of Materials Science and Engineering 2020, **105**(2):49-55.
9. Jie Hu, Ping Wang, D. Liao, Xi-Yang Sun, Z. Gong, Jiwei Liu, Dan Xiong, D. Xiang, X. Zu, Xiao-wei We, *Effects of cobalt(II) sulfate addition on structure and corrosion resistance of alloy micro-arc oxidation coating on the ZL108 Aluminum*, Int. J. Electrochem. Sci., 2020, **15**:4978-4987.

10. Ann V. Karakurkchi, Nikolay D. Sakhnenko, Maryna V. Ved', Ihor S. Luhovskyi, Hryhoriy A. Drobakha, and Maryna V. Mayba, *Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys*, Advances in Materials Science and Engineering, 2019, Article ID 6381291, 13 pp.
11. M. Laveissière, H. Cerda, J. Roche, L. Cassayre, L. Arurault, *In-depth study of the influence of electrolyte composition on coatings prepared by plasma electrolytic oxidation of TA6V alloy*, Surface & Coatings Technology, 2019, **361**:50-62.
12. Ракоч А. Г., Бардин И. В., Ковалев В. Л., Аванесян Т. Г., *Микродуговое оксидирование легких конструкционных сплавов. Часть 1. Основные представления о микродуговом оксидировании легких конструкционных сплавов*, Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. М., 2011, **2**:58-62.
13. Ракоч А. Г., Дуб А. В., Гладкова А. А., *Анодирование легких сплавов про различных электрических режимах. Плазменно - электролитическая нанотехнология*, Старая Басманная, Москва, 2012, 496 с.
14. Ракоч А. Г., Дуб А. В., Бардин И. В., Жаринов П. М., Щедрина И. И., Ковалев В. Л., *Влияние катодной составляющей тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности алюминиевых сплавов*, Коррозия: Материалы, защита, 2007, **12**:36-40.
15. Dai L. B., Li W. F., Zhang G. G., Fu N. Q., Duan Q., *Anti-corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation coating formed on high Si content Al alloy by sectionalized oxidation mode*, Mater. Sci. Eng., 2017, vol.**167**.
16. Мануйлов Л. А., Клоковский Г. И., *Физическая химия и химия кремния*, М.: Высшая школа, 1962, 3-е изд., 311 с.
17. Перельман Ф. М., Зворыкин А. Я., *Кобальт и никель*, М.: Изд. Наука, 1975, 215 с.
18. Торопов Н. А., Барзаковский В. П., Лапин В. В., Курцева Н. Н., *Диаграммы состояния силикатных систем*, Справочник. Выпуск первый. Двойные системы, Изд. «Наука», Ленингр. отд., Л., 1969, 822 с.
19. Xie H. J., Cheng Y. L., Li S. X., Cao J. H., Cao L., *Wear and corrosion resistant coatings on surface of cast A356 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in moderately concentrated aluminate electrolytes*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2017, **27**:336-351.
20. Liu W., Liu Y., Lin Y., Zhang Z., Feng S., Talha M., Shi Y., Shi T., *Effects of graphene on structure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on D16 Al alloy*, Appl. Surf. Sci., 2019, **475**:645-659.

SUMMARY

RESEARCH AND MANUFACTURE OF HIGH HARDNESS AND ANTI-CORROSION COATING ON D16 ALLOY BY PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION

Plasma electrolytic oxidation method (PEO) is used to create high hardness coating with the abrasion resistance and corrosion resistance on alloys of aluminum, magnesium, copper, titanium, etc. Create a coating on the D16 alloy surface by the PEO method in the electrolytic solution of silicate-alkaline $\text{Na}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_n$ modul: 2,85 (12 g/L) and NaOH (2 g/L); add $\text{Co}(\text{OH})_2$ and V_2O_5 to silicate-alkaline solution with a ratio of 2 g/l, we obtain a coating with a hardness increased from 7.3 to 7.9 times, protection efficiency against corrosion in 5 % NaCl solution, it reaches 89.64 to 94.03 %. Through analysis of coating by SEM, EDS and X-Rays methods, it was found that in the coating composition are present of metal oxides, which come from D16 alloy and substances in the electrolyte solutions. The coating has a high hardness due to the formation of aluminum oxide in the form of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Keywords: Plasma electrolytic oxidation, PEO, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, alkaline, alkaline silicate, anticorrosion.

Nhận bài ngày 20 tháng 6 năm 2022

Phản biện xong ngày 05 tháng 8 năm 2022

Hoàn thiện ngày 19 tháng 10 năm 2022

⁽¹⁾ Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga

Liên hệ: Phan Văn Trường

Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga

Số 63 Nguyễn Văn Huyền, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội

Điện thoại: 0983710798; Email: phantruongrvtc@gmail.com