

SO SÁNH KHẢ NĂNG CHỐNG MÀI MÒN CỦA LỚP PHỦ PLASMA ĐIỆN PHÂN VÀ LỚP MẠ CRÔM TRÊN NỀN THÉP DỰA TRÊN THỰC NGHIỆM

EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE WEAR RESISTANCE OF PLASMA ELECTROLYTIC OXIDE COATINGS AND CHROMIUM PLATING ON STEEL SUBSTRATES

Bùi Mạnh Cường¹, Dương Thế Tuấn Anh¹, Nguyễn Bích Ngọc², Vương Anh Tuấn³,
Phan Văn Trường⁴, Thân Đình Thực¹, Đặng Minh Chiến¹, Đỗ Văn Sĩ^{1,*}

¹Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

²Khoa Hoá - Lý kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự

³Viện Công nghệ Mô phỏng, Học viện Kỹ thuật quân sự

⁴Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu so sánh tính chất ma sát và khả năng chống mài mòn của lớp phủ oxit tạo ra bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma (PEO) với lớp mạ crôm truyền thống trên nền thép. Thông qua các nghiên cứu thí nghiệm đã chỉ ra rằng tuy lớp phủ PEO có hệ số ma sát lớn hơn lớp mạ crôm nhưng đổi lại khả năng chống mài mòn vượt trội hơn hẳn lớp mạ crôm trong một số điều kiện làm việc cụ thể. Những kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng của lớp phủ PEO như một giải pháp thay thế thân thiện với môi trường cho lớp mạ crôm trong các chi tiết cơ khí chịu tải trượt.

Từ khóa: Điện phân plasma; Crôm; Ma sát; Mài mòn; UMT.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study on the frictional properties and wear resistance of oxide coatings produced by Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) and traditional hard chromium plating on steel substrates. Experimental investigations reveal that although PEO coatings exhibit a higher coefficient of friction than chromium plating, they demonstrate significantly superior wear resistance under specific operating conditions. These findings highlight the potential of PEO coatings as an environmentally friendly alternative to hard chrome plating for sliding mechanical components.

Keywords: Plasma electrolysis; Chromium; Friction; Abrasion; UMT.



1. TỔNG QUAN

Trong những thập kỷ gần đây, xu hướng sử dụng các lớp phủ kỹ thuật nhằm tăng cường độ bền mài mòn và chống ăn mòn của vật liệu nền đã và đang phát triển mạnh mẽ. Trong đó, lớp mạ crôm cứng là một trong những công nghệ phổ biến nhất, nhờ khả năng tạo lớp bảo vệ có độ cứng cao (~850-1000 HV), hệ số ma sát ổn định và khả năng chịu mài mòn tốt. Tuy nhiên, phương pháp này sử dụng dung dịch chứa Cr^{6+} – một tác nhân gây ung thư và ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Do vậy, việc tìm kiếm giải pháp thay thế thân thiện môi trường, hiệu quả tương đương hoặc vượt trội, đang là hướng nghiên cứu được ưu tiên hàng đầu.

Phương pháp oxy hóa điện phân plasma (Plasma Electrolytic Oxidation – PEO), hay còn gọi là micro-arc oxidation, là một trong các giải pháp tiềm năng thay thế mạ crôm cứng trong một số ứng dụng. Phương pháp này tạo ra lớp phủ oxit bám chắc trên bề mặt kim loại nền (chủ yếu là kim loại “vạn” như Al, Mg, Ti...), có cấu trúc dạng gốm với độ cứng cao, tính cách điện và khả năng chống ăn mòn vượt trội. Bản chất của quá trình là sự kết hợp giữa điện hóa học và hiện tượng phóng điện plasma tại bề mặt điện cực trong môi trường dung dịch điện phân loãng, dẫn đến sự hình thành lớp oxit phức tạp từ cả kim loại nền và thành phần dung dịch.

Tại Việt Nam, ứng dụng công nghệ PEO còn tương đối mới. Công trình nghiên cứu [1] do Viện Độ bền Nhiệt đới (Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga) thực hiện là một trong những nghiên cứu đầu tiên và bài bản về công nghệ PEO trên hợp kim nhôm D16. Trong đề tài này, nhóm tác giả đã xây dựng quy trình công nghệ, khảo sát ảnh hưởng của các thông số như thành phần dung dịch, mật độ dòng điện, tỷ lệ dòng

anot/catot đến độ dày, độ cứng, hình thái và tính chất cơ lý của lớp phủ thu được. Các kết quả thử nghiệm cho thấy lớp phủ đạt độ cứng lên tới 1500 HV, hệ số ma sát dao động từ 0,04 đến 0,7 và khả năng chịu mài mòn tốt theo tiêu chuẩn GOST P 9.318-2013.

Trong công trình [2], các tác giả đã đưa ra vấn đề tổng quan toàn diện về quy trình PEO, từ cơ chế hình thành màng, các thông số vận hành đến tính chất lớp phủ đạt được. Đã mô tả ba lớp chính: lớp rào cản mỏng, lớp working compacts và lớp công nghệ ngoài cùng cũng như trình bày các đoạn quá trình: breakdown/plasma/phục hồi, giúp tạo thành các lớp oxide micro-arc đặc trưng, các kết quả nghiên cứu được thực hiện trên nhiều kim loại (Al, Mg, Ti), cải thiện tính chịu mài mòn, chống ăn mòn, cách điện, chịu nhiệt và làm nổi bật khả năng phủ đồng đều trên bề mặt phức tạp. Phương pháp đưa vào các phụ gia hữu cơ (alcohols, acid, amines, carbohydrate, surfactants...) giúp điều chỉnh xung tia plasma, từ đó làm giảm điện áp breakdown và bọt khí, giảm kích thước lỗ chân lông được đề xuất bởi nhóm tác giả [3], trong đó các phụ gia hữu cơ (alcohols, acid, amines, carbohydrate, surfactants...) giúp điều chỉnh xung tia plasma, từ đó làm giảm điện áp breakdown và bọt khí, giảm kích thước lỗ chân lông. Cơ chế của phương pháp này là các phân tử hữu cơ hấp thụ tại bề mặt điện cực, ảnh hưởng trực tiếp tới quá trình phóng điện (soft plasma), từ đó điều khiển cấu trúc oxide hình thành. Kết quả nghiên cứu đã cải thiện bề mặt PEO cho tăng khả năng chống ăn mòn, ứng dụng trong kim loại nhẹ, bộ phận chịu mài mòn. Công trình [4] Aliofkhazraei và các cộng sự đã phân tích sâu giai đoạn phóng điện anodic/cathodic, micro- và macro-discharge, ảnh hưởng đến cấu trúc lớp. Trình bày hóa-lý-plasma phức tạp để giải thích sự hình thành micro discharge và pha oxide tạo thành. Kết quả nghiên cứu đã giúp

tăng khả năng chống ăn mòn, ma sát, độ bền cơ học, chức năng sinh học (compatibility), photocatalysis, trang trí và ứng dụng trong y khoa, hàng không, ô tô, môi trường.

Tác giả công trình [5] đã kết hợp PEO với vật liệu polymer/silane + oxide nano (TiO_2 , SiO_2 ...), đạt khả năng siêu kỵ nước ($\text{CA} > 150^\circ$). Trình bày cơ chế PEO tạo bề mặt microporous, sau đó phủ/hấp phụ polymer hạ bề mặt năng lượng để đạt tính kỵ nước và barrier giúp chống ăn mòn. Nghiên cứu này cho phép ứng dụng bảo vệ bề mặt trong môi trường ẩm/nhiệt (chống ăn mòn muối biển), tự làm sạch/anti-icing; tiềm năng lớn trong hàng hải và công nghiệp ngoài trời. Nghiên cứu của Aljohani et và cộng sự [6] đã dùng sóng bipolar cao tần tạo lớp mỏng – đặc – ít lỗ hơn; tăng hiệu suất chống ăn mòn đến gấp ~8 lần so với mẫu gốc. Cơ chế của phương pháp sóng bipolar với duty cycle cao làm giảm lỗ, tăng mật độ ion oxide. Nghiên cứu này giúp tối ưu PEO trên hợp kim Mg (AZ91), cải thiện cho các bộ phận nhẹ nhưng cần chống ăn mòn, ví dụ y tế, ô tô. Lu et và cộng sự [7] đã thêm 0.5-2 wt.% GNPs vào PEO coated AZ31 (trong ethanol) làm giảm COF từ ~0.74 đến ~0.07 và giảm đáng kể tỉ lệ mòn nhờ tribolayer graphene, bản chất graphene nanoplatelets tự tạo lớp bôi trơn trên bề mặt khi trượt. công trình nghiên cứu đã giúp tối ưu cho chi tiết nhẹ trong ô tô, hàng không, sử dụng dung môi thân thiện môi trường. Tiếp theo Liu, Peng & Lang và cộng sự [8] đã nghiên cứu tính chất ma sát mài mòn của lớp phủ PEO phủ TC4 giảm ma sát đáng kể trong cả khô và có dầu; dưới dầu, tải trọng ép (compressive stress) là nguyên nhân chính phá hủy lớp phủ, trong nghiên cứu đã chỉ ra PEO tạo lớp ceramic oxide (TiO_2) bảo vệ; dầu bôi trơn làm giảm shear stress, nghiên cứu này đã cải thiện tuổi thọ chi tiết chịu ma sát trên TC4 – phù hợp cho dầu máy và thủy lực. Trong công trình nghiên cứu [9] Azar và cộng sự đã

nghiên cứu khi bôi dầu PAO làm hệ số ma sát giảm xuống ~0.07 nhờ sự phân giải MoDTC và hình thành MoS_2 trên bề mặt PEO. Nghiên cứu này đã tối ưu cho hệ thống vòng bi, chi tiết trượt titanium trong môi trường dầu động cơ. Trong công trình của Li et al [10] đã kết hợp micro arc oxidation (MAO) và dầu PAO đã làm cho hệ số ma sát giảm xuống ~0.062 và tốc độ mòn đạt được $\sim 4.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, nguyên nhân là nhờ phối hợp OLC (đăng bám bề mặt) và MoDTC phân giải thành MoS_2 , tạo tribofilm kép. Nghiên cứu này đã ứng dụng phù hợp với chi tiết titanium chịu tải ma sát cao, nhiệt độ cao trong công nghiệp ô tô, năng lượng.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu mới dừng ở dạng giới thiệu hoàn thiện công nghệ, chưa có nhiều kết quả thực nghiệm. Việc nghiên cứu thực nghiệm sẽ giúp hiểu rõ hơn về cơ chế mài mòn và hiệu quả thực tế của lớp phủ trong các điều kiện làm việc khác nhau. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành nghiên cứu so sánh về hệ số ma sát và khả năng chống mài mòn của lớp phủ plasma điện phân so với lớp mạ crom trên nền thép truyền thống dựa trên thực nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12] bằng cách sử dụng hệ thống đo ma sát mài mòn vạn năng UMT (Universal Multi-Specimen Test System) do hãng CERT sản xuất, được trang bị tại Phòng Thí nghiệm Cơ học máy, Học viện Kỹ thuật quân sự.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT PHƯƠNG PHÁP OXY HÓA ĐIỆN PHÂN PLASMA (PEO)

Oxy hóa điện phân plasma (Plasma Electrolytic Oxidation – PEO) là một quá trình xử lý bề mặt phức tạp, trong đó các phản ứng điện hóa và phóng điện plasma xảy ra đồng thời tại bề mặt điện cực, tạo ra lớp oxit có độ cứng cao và khả năng chống mài mòn vượt trội. Quá trình được tiến hành trong dung dịch điện phân



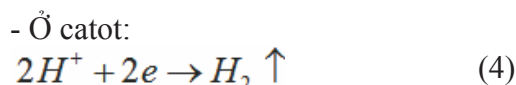
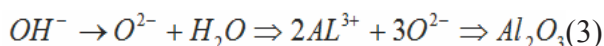
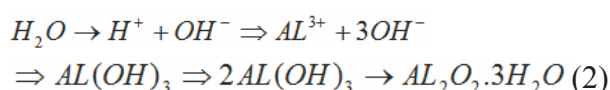
loãng, dưới mật độ dòng điện không đổi, với hiệu điện thế tăng dần theo thời gian.

Quá trình PEO thường trải qua bốn giai đoạn [11]: (I) tạo lớp oxit mỏng ban đầu (anodizing), (II) xuất hiện các điểm phóng điện vi hồ quang (micro-arc), (III) phóng điện ổn định kèm sự tăng trưởng lớp oxit chứa $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, và (IV) phóng hồ quang mạnh gây phá hủy lớp phủ nếu vượt ngưỡng điện áp. Giai đoạn III là giai đoạn hình thành lớp làm việc quyết định đến độ cứng và khả năng chịu mài mòn của lớp phủ.

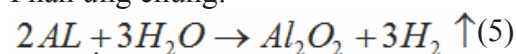
Cơ chế hình thành lớp phủ gồm các phản ứng oxy hóa kim loại nền tại anot, kết tủa và kết tinh oxit nhôm trong pha plasma, đồng thời xảy ra sự đông đặc tại bề mặt. Lớp phủ PEO có thể đạt độ cứng 800-1500 HV, độ dày 60-90 μm và khả năng chống mài mòn cao theo GOST P 9.318-2013, phụ thuộc vào thành phần dung dịch và chế độ dòng điện. Sự hình thành lớp phủ oxit trên bề mặt điện cực thể hiện qua các giai đoạn phản ứng sau:



- Trong dung dịch và màng oxit anot:



Phản ứng chung:



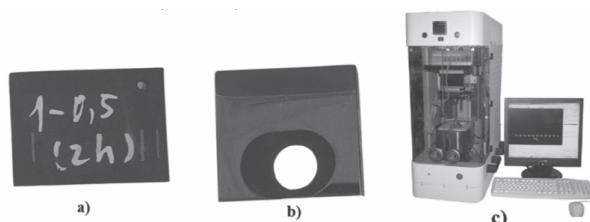
Cơ chế quá trình điện phân plasma hợp kim nhôm trong dung dịch diễn ra như sau [1,

11]: Trước tiên diễn ra quá trình anot hóa bề mặt hợp kim tạo thành lớp màng mỏng cách điện. Tiếp theo, giai đoạn 2 diễn ra sự phóng điện và tăng chiều dày lớp phủ sẽ diễn ra vì sự tương tác của bề mặt kim loại ở các đáy của lỗ và các nguyên tử kim loại trong thành phần hợp kim ở dạng “hơi” với tác nhân oxy hóa plasma (ví dụ: O, O-, O₂-, O₃-, F, F-, ...), tiếp theo diễn ra quá trình dịch chuyển plasma lên bề mặt lớp phủ, ở đây plasma bị làm lạnh, đông cứng lại và dẫn đến hình thành lớp phủ, thành phần chính lớp phủ lúc này là các oxit kim loại của hợp kim. Như vậy, khi điện phân plasma hợp kim nhôm sẽ tạo thành các vùng nóng chảy đặc trưng như thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Hình thái bề mặt lớp phủ plasma [1, 11]

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

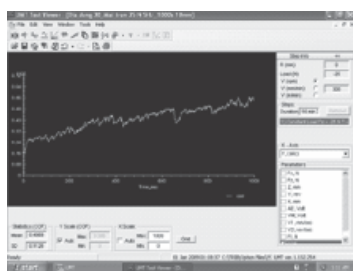


Hình 2. Mẫu và máy thí nghiệm (a - Mẫu phủ lớp điện phân plasma; b - Mẫu mạ crom; c - Máy thí nghiệm)

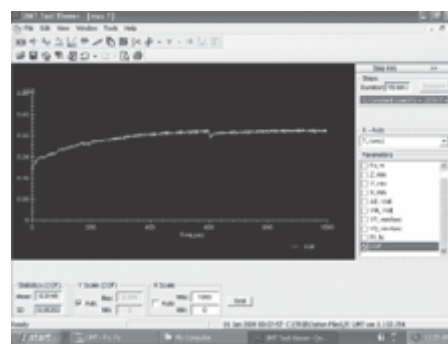
Trước tiên, nhóm tác giả tiến hành thí

nghiệm xác định hệ số ma sát trên 2 loại mẫu. Loại mẫu thử thứ nhất làm từ hợp kim D-16 có kích thước dài x rộng x dày là 50 x 40 x 3 mm được phủ lớp điện phân plasma, quá trình điện phân plasma được thực hiện bằng cách sử dụng nguồn điện AC tần số 50 Hz, mật độ dòng điện 15A/dm². Các mẫu hợp kim nhôm D-16 được nối với anot, bể điện phân được nối với catod, bể điện phân được làm bằng thép không gỉ và được làm mát bằng nước, duy trì nhiệt độ của dung dịch điện phân nhỏ hơn 35 °C để tránh ảnh hưởng bất lợi đến quá trình hình thành lớp phủ. Thời gian tiến hành điện phân 2 giờ, dung dịch điện phân là Na₂O.(SiO₂)_n (12 g/L), NaOH (2 g/L). Loại mẫu thử 2 được mạ crôm có kích thước dài x rộng x dày là 45 x 40 x 15 mm. Thí nghiệm xác định hệ số ma sát, mài mòn theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12] được thực hiện trên hệ thống đo ma sát mài mòn vạn năng UMT (Universal Multi-Specimen Test System) do hãng CERT sản xuất. Hệ thống này được trang bị tại Phòng Thí nghiệm Cơ học máy, Học viện Kỹ thuật quân sự. Mẫu và máy thí nghiệm được thể hiện như trên Hình 2.

Mỗi loại mẫu được tiến hành thí nghiệm 3 lần. Kết quả thí nghiệm xác định hệ số ma sát của h loại mẫu được thể hiện trên Hình 3. Kết quả thí nghiệm cho thấy hệ số ma sát của mẫu mạ plasma là 0,4069 lớn hơn mẫu được mạ crôm với hệ số ma sát là 0,3149, nghĩa là mẫu mạ plasma có hệ số ma sát lớn hơn 29,2 % so với mẫu được mạ crôm.



a)



b)

Hình 3. Hệ số ma sát của các lớp phủ (a - Hệ số ma sát mẫu plasma; b - Hệ số ma sát mẫu mạ crôm)

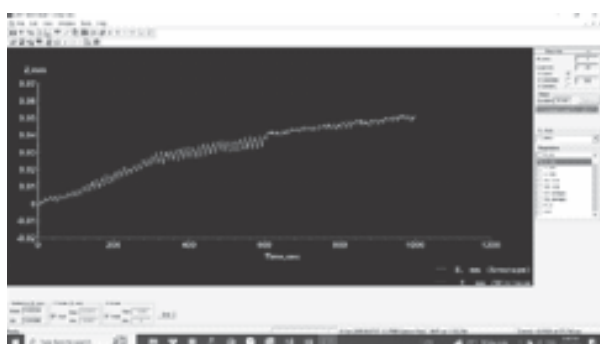
Tiếp theo tiến hành thí nghiệm so sánh khả năng chống mài mòn của 2 loại mẫu, thời gian thí nghiệm 1000 giây theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12]. Kết quả thí nghiệm trên Hình 5 cho thấy rằng chiều sâu mòn của lớp phủ điện phân plasma sau 1000 giây làm việc là 0,03124, trong khi của lớp mạ crôm là 0,09731, nghĩa là chiều sâu mòn của lớp phủ điện phân plasma thấp hơn 67,89%.

Như vậy, kết quả nghiên cứu cho thấy lớp phủ PEO có hệ số ma sát trung bình là 0,4069, cao hơn khoảng 29,2% so với lớp mạ crôm (0,3149). Điều này phản ánh tính chất bề mặt gồm xóp của lớp phủ PEO vốn có xu hướng tăng cường tương tác tiếp xúc khi trượt, dẫn đến ma sát lớn hơn. Tuy nhiên, trong các ứng dụng yêu cầu tính ổn định ma sát hoặc cần kiểm soát hệ số ma sát cao (ví dụ trong phanh, ly hợp...), đặc tính này có thể là một lợi thế.

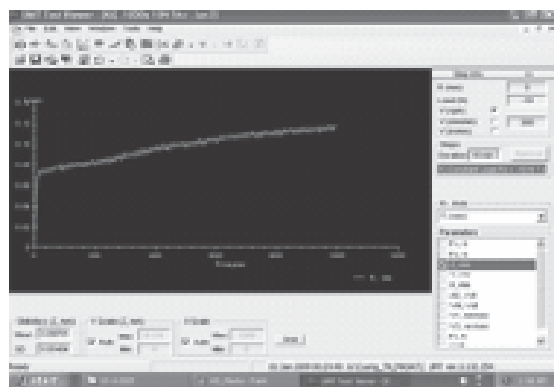
Về khả năng chống mài mòn, lớp phủ PEO thể hiện khả năng vượt trội với chiều sâu mòn sau 1000 giây làm việc chỉ 0,03124 mm, trong khi lớp mạ crôm là 0,09731 mm, tức PEO giảm mức mài mòn tới 67,89%. Sự khác biệt lớn này đến từ cấu trúc lớp phủ gồm oxit dạng α -Al₂O₃ có độ cứng cao, khả năng phân tán ứng suất tốt và chịu mài mòn tốt hơn so với lớp mạ



crôm kim loại đơn thuần. Ngoài ra, trong điều kiện ma sát trượt tuyến tính như chuẩn ASTM G133 sử dụng, sự kết dính chặt giữa lớp phủ PEO và nền cũng góp phần giảm hiện tượng bong tróc, tăng tuổi thọ lớp phủ. Lớp phủ PEO, mặc dù có hệ số ma sát lớn hơn, nhưng khả năng chống mài mòn lại vượt trội trong cùng điều kiện làm việc. Đây là minh chứng thực nghiệm cho tiềm năng ứng dụng của PEO trong các hệ thống cơ khí chịu tải trượt, nơi yêu cầu cao về độ bền và bảo vệ bề mặt.



a)



b)

Hình 5. Kết quả thí nghiệm mài mòn (a - Hệ số ma sát mẫu plasma; b - Hệ số ma sát mẫu mạ crôm)

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo này đã thực hiện nghiên cứu so sánh tính chất ma sát và khả năng chống mài mòn giữa lớp phủ oxit tạo ra bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma (PEO) và lớp

mạ crôm truyền thống trên nền thép. Các kết quả cho thấy lớp phủ PEO có hệ số ma sát cao hơn khoảng 29,2% so với lớp mạ crôm, phản ánh đặc điểm tiếp xúc của bề mặt oxit gốm. Khả năng chống mài mòn của lớp phủ PEO vượt trội, với chiều sâu mòn thấp hơn lớp mạ crôm tới 67,89% trong cùng một điều kiện thí nghiệm. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng của lớp phủ PEO như một giải pháp thay thế thân thiện môi trường cho lớp mạ crôm trong các chi tiết máy cơ khí chịu tải trượt.

Nghiên cứu này cũng mở ra các hướng nghiên cứu tiếp theo về khả năng của lớp PEO trong các điều kiện tải trọng và môi trường khác, đồng thời kết hợp với mô phỏng số để dự đoán tuổi thọ lớp phủ nhằm nâng cao độ tin cậy trong ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm của Bộ môn Cơ học máy, Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự. Tác giả xin cảm ơn Học viện Kỹ thuật quân sự đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 05/6/2025

Ngày phản biện: 20/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Phan Văn Trường, Nguyễn Văn Thành, Đỗ Minh Hiếu, “Nghiên cứu chế tạo lớp phủ có độ cứng cao và chống ăn mòn lên hợp kim D16 bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, Số 28, 12-2022.
- [2]. Sikdar et al., “Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process – Processing Properties, and Applications”. Nanomaterials, 2021.

- [3]. Kaseem & Dikici, “*Optimization of Surface Properties of Plasma Electrolytic Oxidation Coating by Organic Additives*”. Coatings, 2021.
- [4]. Aliofkhazraei et al., “*Review of PEO of Titanium Substrates: Mechanism, Properties, Applications and Limitations*”. Applied Surface Science Advances, 2021.
- [5]. Nominé, J. Martin, C. Noel, G. Henrion, T. Belmonte, I. Bardin, V. Kovalev, A. Rakoch, “*The Evidence of Cathodic Micro-discharges during Plasma Electrolytic Oxidation Process*”. Applied Physics Letters, American Institute of Physics, 2014, 104 (8), pp.081603.
- [6]. Aljohani et al., “*Impact of processing parameters in PEO on AZ91-Mg alloy*”. Engineering Reports, 2022.
- [7]. Lu et al., “*Effect of Graphene Nanoplatelets Content on the Mechanical and Wear Properties of AZ31 Alloy*”. Metals, 2020.
- [8]. Liu, Peng & Lang, “*Investigation of Friction and Wear Performance and Failure Mechanism of PEO Coating on TC4 Alloy*”. TRIBOLOGY, 2019.
- [9]. Azar et al., “*Low Friction Achieved on PEO-Coated TC4 Alloy in the Presence of PAO Base Oil Containing MoDTC*”. Lubricants, 2021.
- [10]. Li et al., “*Synergistic lubrication effect of OLC and MoDTC for reducing friction and wear of MAO ceramic coating on TC4 alloy*”. Int. J. Appl. Ceramic Technology, 2024.
- [11]. 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.
- [12]. ASTM G133-05, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear (2016).
- [13]. Zmitrowicz, A., “*Wear Patterns and Laws of Wear – A Review*”. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, pp. 219-253, 2006.