

NGHIÊN CỨU THỬ NGHIỆM TẠO LỚP PHỦ TiAlN TRÊN NỀN THÉP SKD61 BẰNG KỸ THUẬT HỒ QUANG CATỐT

A STUDY ON FABRICATION OF TiAlN COATING ON SKD61 STEEL SUBSTRATE BY CATHODIC ARC TECHNIQUE

Đoàn Văn Minh¹, Nguyễn Đức Luận²,
Hoàng Văn Gọt¹, Phạm Đức Cường^{2,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2025.328>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thử nghiệm chế tạo lớp phủ đa thành phần TiAlN trên nền thép hợp kim SKD61 bằng phương pháp hồ quang catốt. Trước khi phủ, bề mặt mẫu được xử lý cơ học bằng mài và đánh bóng, làm sạch bằng các dung dịch kết hợp rung siêu âm và cuối cùng sử dụng plasma trong buồng chân không nhằm nâng cao độ sạch và tăng khả năng bám dính với nền thép. Quá trình phủ được thực hiện trên thiết bị HCM-700 được tích hợp hai kỹ thuật phủ thông dụng là phún xạ và hồ quang. Phân tích phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) cho thấy lớp phủ hình thành có thành phần chính là các nguyên tố Ti, Al và N, là nguyên tố cấu thành đặc trưng của lớp phủ TiAlN. Độ cứng tế vi Vickers của lớp phủ sau chế tạo được đo và đạt khoảng 3200HV. Các kết quả này cho thấy đã bước đầu tạo thành công lớp phủ đa thành phần TiAlN trên nền thép SKD61 bằng phương pháp hồ quang, có các đặc tính tương đương lớp phủ TiAlN công bố trên thế giới. Cũng từ kết quả này, có thể khẳng định khả năng làm chủ thiết bị và công nghệ tạo các lớp phủ đa thành phần với đặc tính nổi trội như lớp phủ TiAlN, ứng dụng cho các sản phẩm cơ khí yêu cầu khả năng chịu mài mòn và ổn định nhiệt cao như dụng cụ cắt gia công tốc độ cao, hay các loại khuôn ép, dập nóng tại Việt Nam.

Từ khóa: TiAlN, hồ quang catốt, thép SKD61, EDX, độ cứng tế vi Vickers.

ABSTRACT

This paper presents the results of a preliminary experimental study on the fabrication of a multicomponent TiAlN coating on SKD61 alloy steel substrates using the cathodic arc deposition method. Prior to deposition, the substrate surface was mechanically treated through grinding and polishing, followed by ultrasonic cleaning in chemical solutions, and finally plasma cleaning in a vacuum chamber to enhance cleanliness and improve adhesion to the steel substrate. The deposition process was conducted using the HCM-700 system, which is integration of both sputtering and cathodic arc techniques. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis confirmed that the coating predominantly consists of Ti, Al, and N elements - characteristic components of TiAlN coatings. The Vickers microhardness of the deposited layer was measured at approximately 3200HV. These results indicate the successful formation of a TiAlN multicomponent coating on SKD61 steel using the cathodic arc method with the HCM-700 system. The coating exhibits mechanical properties comparable to those reported for TiAlN coatings internationally. These results also demonstrate the capability to master both the equipment and the deposition technology for fabricating advanced multi-component coatings such as TiAlN with superior mechanical properties. Such coatings are highly suitable for mechanical components that require excellent wear resistance and thermal stability, including high-speed cutting tools and hot forging or die-casting molds in Vietnam.

Keywords: TiAlN, Cathodic arc, SKD61 steel, EDX, Vickers microhardness.

¹Viện Nghiên cứu Cơ khí

²Viện Công nghệ HaUI, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: phamcuong@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/6/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 04/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

1. GIỚI THIỆU

Trong vài thập kỷ qua sự phát triển của các vật liệu và lớp phủ cứng với chiều dày từ vài nano-mét tới micro-

mét đã đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao độ bền, khả năng chống mài mòn và khả năng làm việc trong điều kiện khắc nghiệt cho các chi tiết máy và dụng

cụ cắt. Các lớp phủ gốc nitride của kim loại chuyển tiếp như TiN, CrN, TiCN... đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong ngành cơ khí chính xác, gia công kim loại, khuôn mẫu và hàng không [1-3]. Trong đó, Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) được đánh giá là một trong những vật liệu phủ có tính năng ưu việt nhờ sự kết hợp hài hòa giữa độ cứng cao, tính bền nhiệt và khả năng chống oxy hóa vượt trội [4]. Cơ chế tăng cường tính chất của lớp phủ TiAlN đến từ việc hợp kim hóa nguyên tố Al vào mạng tinh thể TiN. Khi tỷ lệ Al gia tăng, sự thay thế nguyên tử Al vào vị trí Ti trong mạng NaCl của TiN sẽ làm tăng cường tương tác liên kết, đồng thời làm giảm kích thước hạt, dẫn đến hiệu ứng làm cứng hạt tinh thể. Ngoài ra, ở nhiệt độ cao, TiAlN có xu hướng hình thành lớp oxit nhôm mỏng, ổn định, giúp bảo vệ lớp phủ khỏi sự oxy hóa và giảm tốc độ phá hủy khi làm việc trong môi trường nhiệt độ cao [5]. Những đặc điểm này khiến TiAlN trở thành lựa chọn hàng đầu trong các ứng dụng cần độ bền nhiệt cao, chẳng hạn như dao cắt tốc độ cao, khuôn đúc áp lực, hoặc linh kiện cơ khí chịu nhiệt.

Việc chế tạo lớp phủ TiAlN có thể thực hiện bằng phương pháp lắng đọng vật lý trong môi trường chân không với các kỹ thuật như phún xạ, hồ quang... trong đó kỹ thuật hồ quang ca-tốt được sử dụng phổ biến trong công nghiệp nhờ ưu điểm tạo được lớp phủ có mật độ cao, độ bám dính tốt và tốc độ lắng đọng nhanh [6]. Tuy nhiên, kỹ thuật này cũng tồn tại nhược điểm là sinh ra các hạt giọt kích thước micro-mét do hiện tượng bốc hơi nhiệt cục bộ, gây ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt lớp phủ. Việc lựa chọn điều kiện công nghệ phủ phù hợp đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát vi cấu trúc, thành phần pha và tính chất cơ học của lớp màng TiAlN.

Ngoài các yếu tố của quá trình lắng đọng, vật liệu nền cũng ảnh hưởng lớn đến chất lượng và hiệu quả của lớp phủ. Thép SKD61 - tương đương với thép H13 theo tiêu chuẩn Mỹ ASTM A681 - là loại thép hợp kim được sử dụng rộng rãi trong chế tạo khuôn đúc áp lực nhôm và magiê. Loại thép này có độ bền cơ học và khả năng chịu nhiệt cao, tuy nhiên vẫn có nguy cơ bị mài mòn, nứt nhiệt hoặc oxy hóa trong quá trình sử dụng lặp lại ở nhiệt độ cao. Do đó, việc áp dụng lớp phủ như TiAlN lên bề mặt thép SKD61 không những giúp cải thiện đáng kể độ cứng bề mặt, mà còn tăng tuổi thọ làm việc của khuôn trong môi trường nhiệt độ cao.

Trên thế giới, các lớp phủ như TiAlN, AlTiN đã được nghiên cứu và ứng dụng cho các sản phẩm cơ khí, dụng cụ và vẫn tiếp tục được quan tâm. Các nghiên cứu thường tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ Ti/Al hoặc

điều kiện lắng đọng đến tính chất lớp phủ [7, 8]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về tạo lớp phủ cứng bằng phương pháp PVD, vật liệu và các ứng dụng đã được bắt đầu từ hàng chục năm. Tuy nhiên, do khó khăn về trang thiết bị, thiếu các chuyên gia, và đặc biệt là chưa định hướng và đầu tư mạnh vào sản phẩm ứng dụng nên số các nghiên cứu, công trình công bố còn rất hạn chế. Các nghiên cứu mới chủ yếu tập trung vào một số lớp phủ đơn thành phần (TiN, CrN, ZrN...), một vài đề tài gần đây có đề cập tới lớp phủ đa thành phần, đa lớp [9] nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ phủ và đưa ra quy trình phủ. Hiện nay một số doanh nghiệp đã nhập thiết bị và công nghệ phủ, nhưng chỉ có thể áp dụng mỗi quy trình cho 1 loại lớp phủ và nền và trên máy cố định, trong khi các ứng dụng rất đa dạng. Các lớp phủ đa thành phần như TiAlN là bí kíp của doanh nghiệp và có rất nhiều tiềm năng chưa có nghiên cứu sâu nào.

Trong bài báo này, nhóm tác giả thử nghiệm chế tạo lớp phủ đa thành phần Ti-Al-N trên nền thép SKD61 bằng kỹ thuật hồ quang ca-tốt sử dụng thiết bị phủ HCM-700 (thiết bị được tích hợp cả hai kỹ thuật là phún xạ và hồ quang). Sau khi phủ, mẫu được phân tích thành phần bằng kỹ thuật EDX nhằm xác định các thành phần nguyên tố trong lớp phủ. Độ cứng tế vi của mẫu cũng được đo nhằm khẳng định lớp phủ tạo được có thành phần và đặc tính tương tự như lớp phủ TiAlN được công bố, qua đó làm rõ khả năng nâng cao cơ tính mà lớp phủ mang lại cho vật liệu nền. Kết quả thu được là cơ sở ban đầu để mở rộng hướng nghiên cứu khảo sát tối ưu hóa điều kiện phủ cho lớp phủ TiAlN trong tương lai và khẳng định khả năng có thể làm chủ thiết bị và công nghệ PVD trong tạo các lớp phủ đa thành phần cho các sản phẩm và ứng dụng tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

2.1. Chuẩn bị mẫu

Vật liệu nền sử dụng trong nghiên cứu này là thép SKD61, một loại thép hợp kim được sử dụng phổ biến trong các ứng dụng khuôn ép nóng nhờ vào độ cứng cao, khả năng chịu mài mòn và chịu nhiệt tốt. Các mẫu (hình 1) được gia công thành các miếng hình trụ với kích thước $\Phi 12\text{mm}$ và chiều dày 5mm. Trước khi phủ, các mẫu được xử lý bề mặt để đảm bảo điều kiện kết dính tối ưu cho lớp màng mỏng.

Quy trình xử lý bề mặt bao gồm:

- **Mài cơ học** bằng giấy nhám SiC theo thứ tự từ P400 đến P2000 để loại bỏ lớp oxit và làm phẳng bề mặt;
- **Đánh bóng tinh** bằng bột kim cương 1 μm trên máy đánh bóng tự động nhằm đạt được độ nhẵn gương;

- **Làm sạch siêu âm** trong dung môi acetone, sau đó trong ethanol và cuối cùng là nước cất, mỗi bước kéo dài 10 phút, nhằm loại bỏ dầu mỡ, bụi và tạp chất;

- **Sấy khô bằng khí N₂ tinh khiết** ngay trước khi đưa vào buồng phủ để tránh hấp thụ ẩm từ không khí.

Các bước xử lý này là cần thiết để tăng độ bám dính của màng TiAlN lên nền SKD61, đồng thời giảm thiểu sự xuất hiện của khuyết tật trong màng phủ.



Hình 1. Hình ảnh các mẫu thép SKD61

2.2. Hệ thống thiết bị phủ và nguyên liệu sử dụng

Hệ thống thiết bị tạo lớp phủ:



Hình 2. Hình ảnh thiết bị HCM-700

Lớp phủ TiAlN được tạo ra bằng kỹ thuật hồ quang catốt trong môi trường chân không, cho phép tạo lớp phủ có độ tinh sạch cao, khả năng bám dính tốt với nền, lớp phủ đạt độ cứng cao nhờ vào nguồn năng lượng plasma mạnh và mật độ ion cao [10]. Quá trình phủ được thực hiện trên hệ thống phủ bằng phương pháp PVD trên thiết bị HCM-700 (hình 2) được thiết kế, chế tạo và tích hợp

trong khuôn khổ để án thuộc chương trình công nghiệp hỗ trợ. Thiết bị có quy mô bán công nghiệp với khả năng sử dụng riêng hoặc đồng thời hai kỹ thuật phun xạ và hồ quang ca-tốt trong một quy trình phủ, được tích hợp bộ gia nhiệt mẫu, điều khiển lưu lượng khí tự động và nguồn xung catốt.

Các thông số cơ bản như sau: Công suất đầu hồ quang: 10kW, công suất nguồn bias: 20kW, độ chân không lớn nhất: 5×10^{-4} Pa, nhiệt độ gia nhiệt tối đa: 500°C



Hình 3. Hình ảnh bia hồ quang TiAl với tỉ lệ Ti:Al là 7:3

Vật liệu phủ: bia hợp kim TiAl (tỉ lệ Ti:Al là 7:3) (hình 3) có đường kính 100mm, độ tinh khiết 99,99%, được lắp cố định tại 4 vị trí bên cạnh buồng chân không. Nitơ tinh khiết 99,999% được sử dụng và cấp vào buồng chân không qua bộ điều khiển lưu lượng khí, để tạo thành nitride trong quá trình lắng đọng.

2.3. Quy trình tạo lớp phủ TiAlN

Quá trình phủ được thực hiện lần lượt theo các bước sau:

- Bước 1: tạo chân không nền và gia nhiệt sơ bộ

Buồng phủ được hút chân không đến áp suất nền khoảng 5×10^{-3} Pa bằng bơm turbo phân tử. Sau đó, mẫu được gia nhiệt sơ bộ đến 450°C trong vòng 30 phút nhằm tăng cường khuếch tán nguyên tử, loại bỏ hơi ẩm và nâng cao khả năng bám dính của lớp màng lên nền [10].

- Bước 2: làm sạch mẫu bằng ion Argon (plasma)

Sau gia nhiệt, một giai đoạn làm sạch bề mặt bằng plasma được tiến hành:

- Argon tinh khiết được đưa vào buồng, nâng áp suất lên khoảng 5×10^{-2} Pa;
- Điện thế bias âm -900V được áp lên nền để tạo quá trình bắn phá bề mặt bằng ion Ar⁺;
- Thời gian làm sạch kéo dài 10 phút.

Giai đoạn này giúp loại bỏ lớp oxit cuối cùng và hoạt hóa bề mặt cơ học, thúc đẩy quá trình kết tinh định hướng khi màng bắt đầu hình thành.

- Bước 3. Lắng đọng tạo lớp TiAlN

Sau khi làm sạch, van khí Nitơ được mở và điều chỉnh ở lưu lượng 500sccm. Quá trình hồ quang catốt được kích hoạt và thực hiện phủ với các thông số công nghệ quá trình phủ như bảng 1 [11].

Bảng 1. thông số công nghệ quá trình phủ

Tham số	Giá trị
Dòng điện catốt	80A
Nhiệt độ nền	450°C
Lưu lượng khí N ₂	500sccm
Thời gian phủ	60 phút
Áp suất buồng	5×10 ⁻² Pa
Giá trị điện thế bias	-100V

- Bước 4. Làm nguội và lấy mẫu

Sau khi kết thúc quá trình lắng đọng, các mẫu được giữ trong buồng để nguội từ từ dưới chân không nhằm tránh nứt gãy do sốc nhiệt. Sau khi đến nhiệt độ phòng, mẫu được tháo ra khỏi buồng, đánh dấu và bảo quản trong hộp kín.

2.4. Đo độ cứng tế vi Vickers

Độ cứng tế vi Vickers của lớp phủ TiAlN được đo bằng máy thử độ cứng tế vi ISOSCAN HV2 AC của hãng GALILEO, với tải trọng 25g và thời gian giữ tải 10 giây. Mỗi mẫu được đo tại 5 vị trí khác nhau để đảm bảo độ tin cậy sau đó tính giá trị trung bình.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong môi trường plasma giàu nitơ, các ion kim loại Ti⁺, Al⁺ từ bia bị hồ quang bốc hơi và di chuyển đến bề mặt mẫu. Các phản ứng với N₂ xảy ra ngay tại vùng gần bề mặt nền, hình thành nên lớp phủ TiAlN kết tinh với cấu trúc tinh thể NaCl [12-14]. Hình 4 là ảnh các mẫu thép SKD61 với lớp phủ TiAlN được tạo theo quy trình trên. Qua kiểm tra sơ bộ, có thể thấy lớp phủ đều trên toàn bộ bề mặt mẫu với màu sắc đặc trưng, không bị bong tróc.

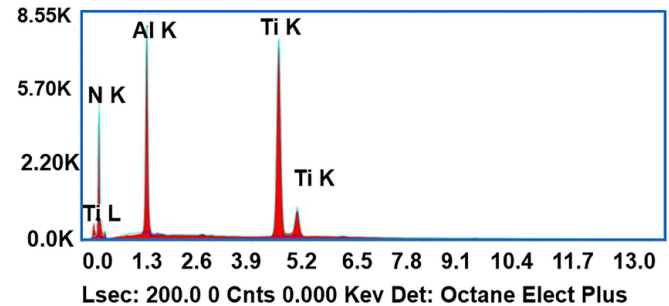


Hình 4. Hình ảnh mẫu SKD61 đã được phủ TiAlN

Các mẫu sau phủ được mang đi phân tích thành phần hóa học và đo độ cứng tế vi nhằm khẳng định lớp phủ tạo được là TiAlN.

3.1. Phân tích thành phần lớp phủ

Mẫu có lớp phủ được mang đi phân tích EDX nhằm xác định các thành phần hóa học. Kết quả phổ EDX thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Phổ EDX thành phần nguyên tử trong lớp phủ TiAlN

Từ phổ EDX có thể thấy có các nguyên tố Ti, Al, và N xuất hiện với các đỉnh tương ứng với N K, Ti K và Al K tại khoảng 0,1keV; 4,5keV và 1,3keV, cùng hai đỉnh nhỏ Ti L và Ti K ở vùng lân cận. Sự có mặt rõ rệt và cường độ cao của các đỉnh Ti và Al cho thấy lớp phủ đã hình thành từ hai thành phần kim loại chính như mong muốn. Sự xuất hiện của đỉnh N tuy có cường độ thấp hơn nhưng vẫn thể hiện rõ ràng, chứng minh rằng nitơ đã phản ứng thành công với Ti và Al để tạo thành lớp phủ nitride TiAlN.

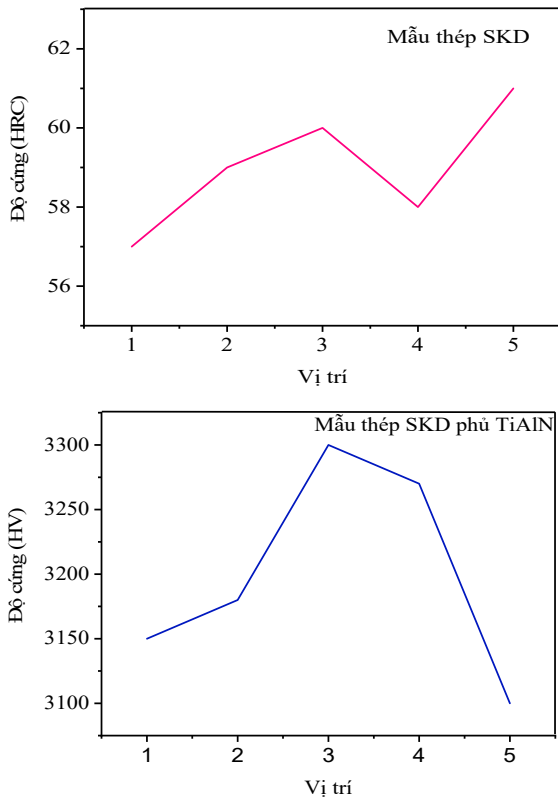
Không phát hiện các đỉnh đặc trưng của các nguyên tố lạ hoặc tạp chất như O, Fe, hay C trong phổ, cho thấy lớp phủ có độ tinh khiết cao và quá trình phủ diễn ra trong môi trường chân không được kiểm soát tốt.

Cường độ đỉnh Ti cao hơn đáng kể so với Al và N trong các lớp phủ TiAlN do tỉ lệ Ti thường được duy trì cao hơn để tăng độ cứng và ổn định pha trong các ứng dụng chịu mài mòn [15]. Phổ EDX thu được đã khẳng định sự hiện diện đầy đủ của ba nguyên tố chính hình thành lớp phủ đa thành phần TiAlN.

3.2. Độ cứng tế vi Vickers

Hình 6 biểu diễn các kết quả đo độ cứng Vickers của nền thép SKD61 và lớp phủ TiAlN tại 5 vị trí khác nhau. Giá trị độ cứng tế vi trung bình của lớp phủ TiAlN đạt khoảng 3200HV, cao hơn nhiều so với độ cứng của thép nền SKD61 khoảng 58 - 60HRC (~700HV).

Sự đồng nhất giá trị độ cứng ở các điểm đo khác nhau cho thấy lớp phủ có tính đồng nhất cao về mặt cơ học, phù hợp với kết quả quan sát bề mặt và độ dày đồng đều của lớp phủ. Các nghiên cứu trước đó công bố độ cứng màng TiAlN phủ bằng kỹ thuật hồ quang catốt với điều kiện phủ tương tự trong đạt khoảng 2200 - 3000HV [6].



Hình 6. Độ cứng của mẫu thép SKD61 (trái) và mẫu thép SKD phủ TiAlN (phải)

Cùng với kết quả phân tích thành phần hóa học bằng EDX, giá trị độ cứng tế vi đo ở trên khẳng định lớp phủ tạo được trong nghiên cứu này là TiAlN với các đặc tính vượt trội trong việc nâng cao khả năng chống mài mòn và tăng cường cơ tính cho bề mặt thép SKD61 [5].

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, lớp phủ TiAlN đã được chế tạo thành công trên nền thép SKD61 bằng thiết bị phủ PVD HCM-700. Các kết quả phân tích thành phần hóa học và đo độ cứng tế vi cho thấy đã tạo thành công lớp phủ đa thành phần TiAlN, có độ đồng đều và độ cứng cao, phù hợp cho ứng dụng trong môi trường làm việc chịu mài mòn và nhiệt độ cao.

Kết quả bước đầu này khẳng định khả năng từng bước làm chủ thiết bị và công nghệ trong lĩnh vực phủ PVD của nhóm nghiên cứu, tạo được các lớp phủ đa thành phần cho các ứng dụng thực tiễn như khuôn mẫu làm từ thép hợp kim tăng nhằm cơ tính và độ bền.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. PalDey S., Deevi S.C., "TiN, TiAlN and CrN coatings: A review," *Mater. Sci. Eng. A*, 342(1), 58-79, 2020.

[2]. Mayrhofer P.H., et al., "Structure–property relationships of TiAlN coatings," *Prog. Mater. Sci.*, 66, 1-47, 2021.

[3]. Lin J., et al., "Oxidation behavior of TiAlN coatings at high temperature," *Thin Solid Films*, 519(17), 5559-5566, 2021.

[4]. Vetter J., "A review of TiAlN coatings in cutting applications," *Surf. Coat. Technol.*, 257, 1-13, 2021.

[5]. Chiu H.T., Lee C.Y., "TiAlN coatings deposited by cathodic arc evaporation: structure and properties," *Appl. Surf. Sci.*, 258(6), 2185-2190, 2022.

[6]. Dearnley P.A., "Surface engineering of tool steels: status and outlook," *J. Mater. Process. Technol.*, 211(1), 38-49, 2020.

[7]. Kraynova E. O., Grenadyorov A. S., Semenov V. A., Solovyev A. A., "The Influence of the Elemental Composition on the Mechanical and Tribological Properties of TiAlN Coatings," *High Energy Chemistry*, 58, S344–S348, 2024. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701145>

[8]. Méndez A., Monclus M. A., Santiago J. A., et al., "Effect of Al content on the hardness and thermal stability study of AlTiN and AlTiBN coatings deposited by HiPIMS," *Surface and Coatings Technology*, 422, 127513, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127513>

[9]. Hollerweger, R., Riedl, H., Paulitsch, J., et al., "Origin of High Temperature Oxidation Resistance of Ti-Al-Ta-N Coatings," *Surface and Coatings Technology*, 257, 78-86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.02.067>

[10]. Musil J., "Hard and superhard nanocomposite coatings," *Surface and Coatings Technology*, 125(1-3), 322–330, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00586-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00586-X)

[11]. T. Czerwiec, V. Teixeira, P. Steyer, et al., "Cathodic arc deposition of TiAlN coatings: Process parameters and tribological behavior," *Surface and Coatings Technology*, 174-175, 1216-1221, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00461-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00461-0)

[12]. Y. Guo, P. Yu, M. Chen, X. Zhao, H. Sun, "Structural evolution and mechanical properties of TiAlN coatings with varying Al content," *Surf. Coat. Technol.*, 374, 925-931, 2019. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.06.081.

[13]. S. Das, A. S. Bhattacharyya, R. Bandyopadhyay, "Micro-structural and bonding structure analysis of TiAlN thin films deposited with varying N₂ flow rate via ion beam sputtering technique," *Mater. Chem. Phys.*, 250, 123018, 2020. doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123018.

[14]. A. Dani, V. Sharma, S. Kumar, "Development and characterization of nanostructured TiAlN thin films by reactive magnetron sputtering," *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings*, Springer, 209-220, 2017. doi: 10.1007/978-981-10-4765-7_16.

[15]. Zhang S., Wang Y., Li X., "Effects of bias voltage on microstructure and mechanical properties of TiAlN coatings deposited by arc ion plating," *Vacuum*, 175, 109268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109268>

AUTHORS INFORMATION

Doan Van Minh¹, Nguyen Duc Luan²,
Hoang Van Got¹, Pham Duc Cuong²

¹National Research Institute of Mechanical Engineering, Vietnam

²HaUI Institute of Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam