

Khảo sát tính chất bề mặt lớp phủ TiN và CrN trên nền thép SKD61 thấm nito^{*} theo công nghệ xử lý bề mặt duplex

Nguyễn Văn Thành^{1*}, Nguyễn Thành Hợp¹, Đặng Thị Thu Hồng², Nguyễn Văn Tích², Lê Thị Giang³

¹Trung tâm Quang điện tử, Viện Ứng dụng Công nghệ, 25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

²Trung tâm Đánh giá không phá hủy, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, 140 Nguyễn Tuân, phường Thanh Xuân Trung, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy Lợi, 175 Tây Sơn, phường Trung Liệt, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 24/7/2024; ngày chuyển phản biện 26/7/2024; ngày nhận phản biện 12/8/2024; ngày chấp nhận đăng 15/8/2024

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, lớp phủ cứng crôm nitorit (CrN) và titan nitorit (TiN) được lắng đọng bằng phương pháp bay hơi hồ quang catốt trên bề mặt thép SKD61 sau nhiệt luyện và thấm nito. Cấu trúc tế vi và tính chất của bề mặt các mẫu được khảo sát bằng kính hiển vi quang học, kính hiển vi soi nổi, máy đo độ cứng tế vi, độ bám dính của lớp phủ được đánh giá theo Tiêu chuẩn VDI 3198 và kiểm tra khả năng chống mài mòn. Cấu trúc tế vi của lớp bề mặt xử lý duplex gồm lớp phủ mỏng CrN hoặc TiN có chiều dày khoảng 2 μm trên nền thép SKD61 thấm nito (~90 μm). Độ bám dính của màng CrN và TiN trên thép thấm nito được nâng cao so với độ bám dính của lớp phủ trên nền thép nhiệt luyện. Độ bám dính lớp phủ CrN và TiN trên nền thép nhiệt luyện chỉ đạt HF6, trong khi đó độ bám dính lớp phủ tương ứng trên nền thép thấm N đạt HF2-HF3. Độ cứng bề mặt và khả năng chống mài mòn của thép được cải thiện nhờ quá trình xử lý đồng thời công nghệ lắng đọng plasma hồ quang catốt và thấm nito. Mẫu phủ TiN trên nền thép thấm nito có độ cứng và khả năng chịu mài mòn tốt nhất. Điểm đáng chú ý là lớp phủ TiN thể hiện độ cứng bề mặt và khả năng chống mài mòn cao hơn lớp phủ CrN.

Từ khóa: công nghệ xử lý bề mặt duplex, crôm nitorit, lớp phủ cứng, titan nitorit.

Chỉ số phân loại: 2.3, 2.5

Investigation of surface properties of TiN and CrN coatings on nitrided SKD61 steel using duplex surface treatment technology

Van Thanh Nguyen^{1*}, Hop Thanh Nguyen¹, Thi Thu Hong Dang², Van Tich Nguyen², Thi Giang Le³

¹Optoelectronics Center, National Center for Technological Progress, 25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

²Center for Non-Destructive Evaluation, Vietnam Atomic Energy Institute, 140 Nguyen Tuan Street, Thanh Xuan Trung Ward, Thanh Xuan District, Hanoi, Vietnam

³Faculty of Mechanical Engineering, Thuyloi University, 175 Tay Son Street, Trung Liet Ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam

Received 24 July 2024; revised 12 August 2024; accepted 15 August 2024

Abstract:

In this study, CrN and TiN hard thin films were deposited on nitrided SKD61 steel or heat-treated substrates using the cathodic arc plasma evaporation method. The microstructure and surface properties of thin films were investigated by optical microscope, stereo microscope, microhardness test, adhesion test by Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 3198 standard, and abrasion test. The microstructure of the duplex-treated surface layer consists of a thin CrN or TiN coating with a thickness of about 2 μm on a nitrided SKD61 steel substrate (~90 μm). The adhesion of CrN and TiN films on the nitrided substrate was enhanced compared to the adhesion of the coatings deposited on the heat-treated steel substrate. The adhesion of CrN and TiN coatings on heat-treated steel substrates only reached HF6, while the adhesion of the corresponding coatings on N-impregnated steel substrates reached HF2-HF3. The surface hardness and wear resistance of the steel were improved by the simultaneous processing of cathodic arc plasma deposition and nitriding technology. The surface of thin film TiN coated on N-treated steel substrates has the best hardness and wear resistance. It is noteworthy that TiN coating exhibits higher surface hardness and wear resistance than CrN coating.

Keywords: CrN, duplex surface treatment technology, hard coating, TiN.

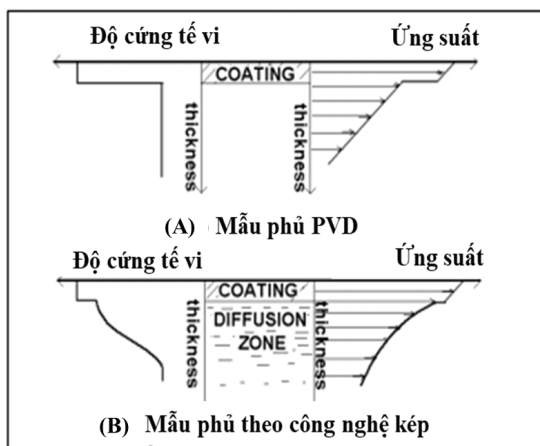
Classification numbers: 2.3, 2.5

^{*}Tác giả liên hệ: Email: thanhmaterial@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Lớp phủ bảo vệ (cứng, chống ăn mòn hay mài mòn) chế tạo bằng phương pháp lắng đọng plasma bay hơi hồ quang catốt đã được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp bởi những ưu điểm nổi trội như lớp phủ xít chặt, đồng đều, tốc độ phủ lớn và có thể tạo nên đa dạng các loại hình lớp phủ dạng đơn hợp phần như TiN [1], CrN [2, 3], ZrN [4] hay đa hợp phần như TiCrN [3, 5], CrAlN [5] hoặc lớp phủ đơn lớp [5]... Trong đó, 2 lớp phủ TiN và CrN là 2 lớp phủ phổ biến nhất [6]. Tuy nhiên, chênh lệch độ cứng giữa lớp phủ với nền thép quá cao sẽ làm giảm độ bám dính giữa lớp phủ với nền thép.

Hiện nay công nghệ xử lý duplex (duplex treatment) là một phương pháp biến đổi tính chất bề mặt kim loại, khi 2 hoặc nhiều hơn các công nghệ xử lý bề mặt được thực hiện kết hợp tuần tự, kết quả bề mặt kim loại có tính chất vượt trội so với việc sử dụng từng công nghệ đơn lẻ. Trong một số trường hợp, thuật ngữ duplex được hiểu theo nghĩa hẹp là sự kết hợp của 2 công nghệ xử lý hóa nhiệt luyện và phủ physical vapor deposition (PVD) lớp phủ cứng chịu mài mòn [7, 8]. Phân bố độ cứng của lớp phủ lên nền thép không được thấm (phủ thông thường/không phải phủ kép) được thể hiện như hình 1A. Khi chịu lực gây biến dạng, ứng suất không liên tục giữa lớp phủ và nền gây ra sự chênh lệch modun đàn hồi Young. Thêm vào đó, nền có độ cứng thấp không có khả năng chịu tải để hỗ trợ tốt cho lớp phủ dày, dẫn tới lớp phủ dễ bị phá hủy dưới một tải trọng không cao. Sau khi xử lý bề mặt duplex (lớp phủ PVD trên nền thép thấm nitơ) sẽ kết hợp ưu điểm của cả hai phương pháp. Lớp phủ PVD tạo bề mặt có hệ số ma sát thấp, có khả năng chống mài mòn và độ cứng bề mặt cao. Lớp thấm nitơ (hóa nhiệt luyện) trung gian có khả năng chống ứng suất cắt, độ bền đứt gãy và khả năng chịu tải và ngoài ra còn tạo gradient độ cứng và ứng suất (hình 1B) thay đổi một cách từ từ (từ ngoài bề mặt vào bên trong chi tiết) để hạn chế chênh lệch ứng suất, do đó nâng cao được độ bám dính cho lớp phủ.



Hình 1. Tính chất cơ học của (A) Xử lý đơn: Vật liệu + Lớp phủ cứng; (B) Xử lý kép: Vật liệu đã nhiệt luyện hóa bền bề mặt + Lớp phủ cứng [8].

Nghiên cứu của D.T. Bình và cs (2017) [9] đã sử dụng thiết bị phun xạ xung một chiều B30 và thiết bị Dreva-400 của Trung tâm Quang điện tử, Viện Ứng dụng Công nghệ để nghiên cứu phủ CrN và TiN (đơn lớp) trên nền thép SKD61 sau nhiệt luyện. Tuy nhiên, chưa có công trình nào so sánh đặc tính lớp phủ TiN và CrN trên nền thép SKD61 thấm thể khí theo công nghệ duplex tại Việt Nam.

Nghiên cứu này trình bày kết quả nghiên cứu công nghệ duplex chế tạo lớp phủ TiN và CrN trên nền thép SKD61 đã thấm nitơ và so sánh với lớp phủ trên nền thép nhiệt luyện thông thường.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu, chế tạo và ký hiệu mẫu

Thanh thép SKD61 của Công ty Daido (Nhật Bản) có thành phần (theo khối lượng) 0,387% C, 5,413% Cr, 1,035% Si, 0,758% V, 1,182% Mo và 0,41% Mn được cắt thành các mẫu có kích thước $\varnothing 22 \times 7$ mm. Các mẫu thép được xử lý nhiệt, bao gồm tôi ($1030^\circ\text{C}/30$ phút) và ram 2 lần ($580^\circ\text{C}/2$ giờ) trong lò tôi chân không Turbo2 Treater M của Viện Công nghệ - Bộ Công Thương. Sau khi ram, tất cả các mẫu được mài và đánh bóng bằng máy Tegramin 30 đạt độ nhám $Ra \leq 0,5 \mu\text{m}$. Ký hiệu mẫu sau nhiệt luyện (tôi + ram) là H. Để tạo lớp hóa bền trung gian, mẫu được thấm nitơ trong lò thấm kiểu giếng T-01a ở nhiệt độ 525°C , thời gian thấm 8 giờ, với môi trường thấm được duy trì ổn định với tỷ lệ lưu lượng khí $Q_{\text{NH}_3}/Q_{\text{N}_2}$ khoảng 0,2.

Các loại mẫu trước khi phủ đều được mài và đánh bóng bằng bột kim cương cỡ hạt $1 \mu\text{m}$ để đảm bảo độ nhám bề mặt chi tiết, Ra khoảng $0,03 \mu\text{m}$. Nền thép thấm nitơ được ký hiệu N.

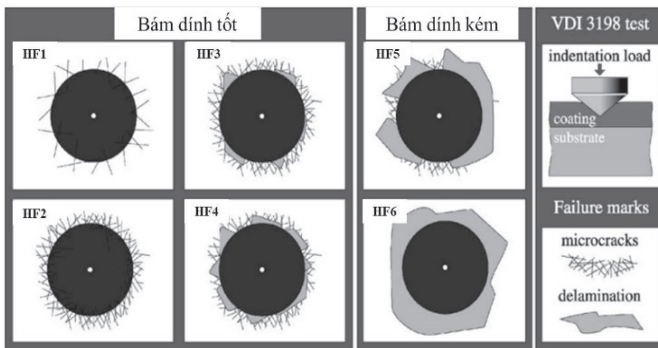
Thực hiện phủ CrN và TiN lên mẫu thép sau nhiệt luyện H và sau thấm H-N bằng máy phủ hồ quang Dreva-400 (Đức) trong thời gian 15 phút. Thiết bị phủ PVD sử dụng bia Ti và Cr đường kính $\varnothing 100$ mm có độ tinh khiết 99,955%, với khoảng cách từ bia tới mẫu phủ khoảng 150 mm. Quá trình phủ được thực hiện trong điều kiện áp suất $2,4 \times 10^{-2}$ Pa, nhiệt độ $300 \pm 5^\circ\text{C}$, lưu lượng khí N_2 (độ tinh khiết 99,99%) khoảng $250 \text{ cm}^3/\text{phút}$. Thời gian phủ khoảng 30 phút. Chế độ phủ được lựa chọn để tối ưu độ bám dính và giảm số hạt macro trên thiết bị của đơn vị. Ký hiệu mẫu phủ TiN trên nền thép nhiệt luyện và nền thép thấm N lần lượt là H-TiN, H-N-TiN. Tương tự, ký hiệu H-CrN và N-CrN lần lượt là mẫu phủ CrN trên nền thép nhiệt luyện và thấm N.

2.2. Thử nghiệm phân tích đặc tính mẫu

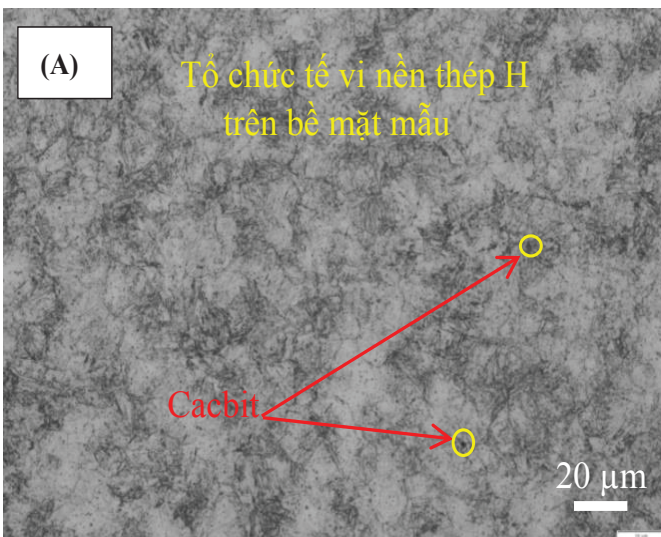
Nghiên cứu sử dụng thiết bị của Trung tâm Đánh giá Không phá hủy (NDE) - Bộ Khoa học và Công nghệ để chuẩn bị và phân tích tính chất bề mặt của các mẫu qua

các trạng thái chế tạo. Mẫu kim tương bề mặt và mặt cắt ngang được tẩy thực và quan sát trên kính hiển vi quang học Axiovert A1 MAT. Kính hiển vi soi nổi Keyence (VHX-7000) được sử dụng để chụp ảnh mặt cắt ngang xác định cấu tạo mẫu phủ theo công nghệ xử lý duplex. Độ cứng bề mặt và độ cứng tế vi được đo trên thiết bị LM-300AT.

Độ bám dính của lớp phủ được đo theo tiêu chuẩn VDI 3198 bằng cách sử dụng đầu đo HRC gia tải 150 kg lên bề mặt mẫu nghiên cứu (sử dụng thiết bị 751-Wilson Wolpert), sau đó chụp ảnh bề mặt vết đâm bằng kính hiển vi quang học Axiovert A1 MAT. Hình ảnh chụp vết ấn được đối chiếu với thang phân loại của tiêu chuẩn VDI 3198 [10] như hình 2. Tiêu chí đối chiếu với thang phân loại dựa trên hình dạng, số lượng vết nứt tế vi xuyên tâm, mức độ bong tróc của lớp phủ ở vị trí xung quanh đường bao tròn bên trên của vết ấn. Giá trị HF càng nhỏ thì độ bám dính của lớp phủ càng tốt. Thử nghiệm ma sát bi trên tấm phẳng (ball on flat) được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM G133-05, sử dụng thiết bị CETR UMT-2 với độ lớn của tải là 1 N, biên độ chuyển động của bi 10 mm, tần số 5 Hz.



Hình 2. Xác định độ bám dính theo Tiêu chuẩn VDI 3198 [11].



3. Kết quả và bàn luận

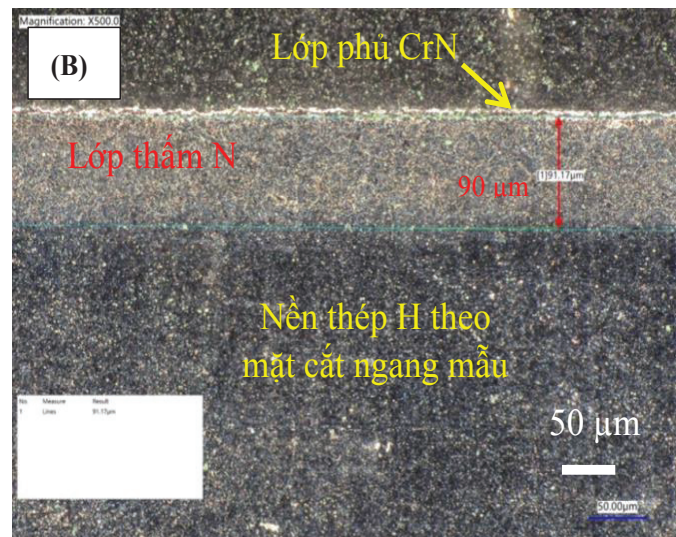
3.1. Cấu trúc tế vi

Hình 3A là ảnh tổ chức mẫu thép sau nhiệt luyện H (sau tôi + ram) bao gồm tổ chức mactenxit ram và cacbit không hòa tan (hình cầu). Cấu trúc lớp phủ kép hình 3B, ngoài cùng là lớp phủ có chiều dày khoảng 2 μm , tiếp đến là lớp thấm nitơ trung gian có chiều dày khoảng 90 μm , trong cùng là nền thép.

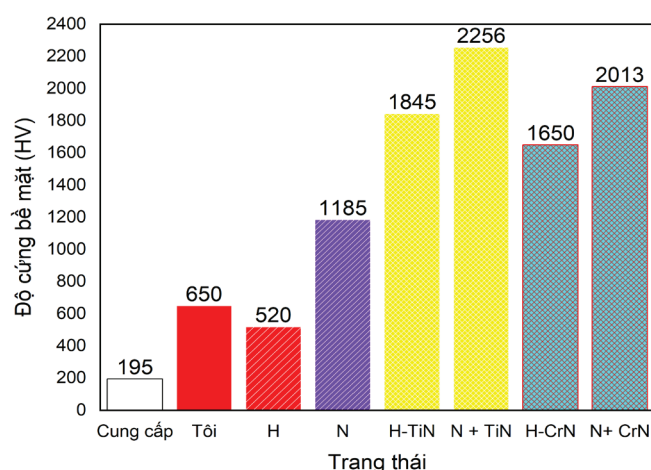
3.2. Độ cứng tế vi

Độ cứng các mẫu nghiên cứu được thể hiện trong hình 4. Mẫu sau tôi đạt độ cứng tối đa khoảng 650 HV (tương đương 55 HRC) của thép SKD61. Tuy nhiên, thép sau tôi thường không được sử dụng vì giòn và ứng suất dư lớn. Do vậy, thép được ram để có độ cứng thấp hơn (520 HV) nhưng độ bền tăng nhằm đảm bảo cơ tính tổng hợp cho những ứng dụng trong thực tế. Thép sau thấm nitơ có độ cứng khoảng 1185 HV, giúp chi tiết thấm có khả năng chống mài mòn cao.

Sau khi phủ CrN, độ cứng bề mặt đều tăng lên so với nền. Lớp phủ PVD cứng trên thị trường thường có chiều dày không quá 5 μm . Do đó, độ cứng đo trên bề mặt lớp phủ như hình 4 chịu ảnh hưởng bởi độ cứng của nền thép. Độ cứng bề mặt mẫu phủ H-TiN và N-TiN lần lượt là 1845 và 2256 HV, trong khi đó độ cứng mẫu phủ H-CrN và N-CrN lần lượt là 1650 và 2013 HV. Như vậy, độ cứng của lớp phủ TiN cao hơn CrN trong cùng điều kiện cũng phù hợp với công bố trên thế giới [11]. Độ cứng lớp phủ theo công nghệ duplex cao hơn lớp phủ thông thường do lớp thấm N có độ cứng trung gian (giữa lớp phủ - nền nhiệt luyện) và có khả năng chịu tải nén tốt hơn nền thép nhiệt luyện.



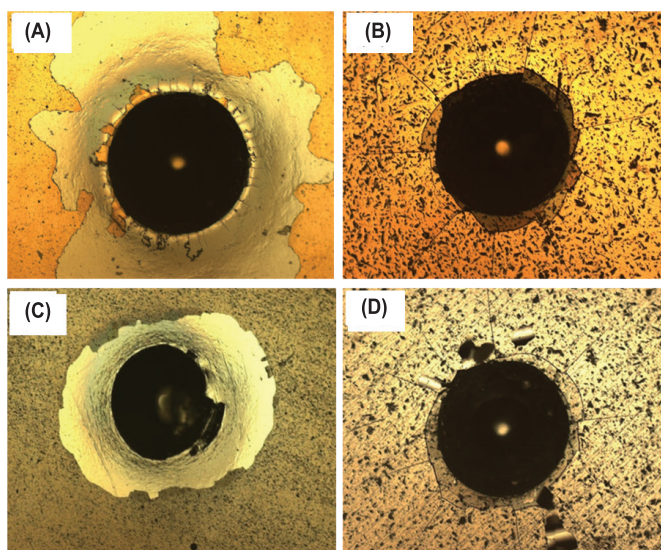
Hình 3. Hình ảnh tổ chức tế vi: (A) Nền thép (H) và (B) Tổ chức tế vi theo mặt cắt ngang mẫu phủ theo công nghệ duplex (N-crôm nitrit).



Hình 4. Độ cứng bề mặt của mẫu nghiên cứu.

3.3. Độ bám dính

Độ bám dính là thông số kỹ thuật quan trọng trong công nghệ phủ PVD nói chung và hồ quang catốt nói riêng. Một trong những hướng nghiên cứu chính hiện nay của các nhà khoa học trên thế giới là tìm ra giải pháp nâng cao độ bám dính giữa lớp phủ độ cứng cao với nền kim loại độ cứng thấp. Lớp phủ có độ bám dính tốt mới đảm bảo khả năng bảo vệ bề mặt trước tác dụng mài mòn, va đập của môi trường làm việc... Kết quả xác định độ bám dính của hai lớp phủ TiN và CrN trên nền thép nhiệt luyện và thấm được thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Hình ảnh bề mặt mẫu phủ sau thử nghiệm bám dính theo Tiêu chuẩn VDI 3198. (A) H-titan nitorit, (B) N-titan nitorit, (C) H-crôm nitorit, (D) N-crôm nitorit.

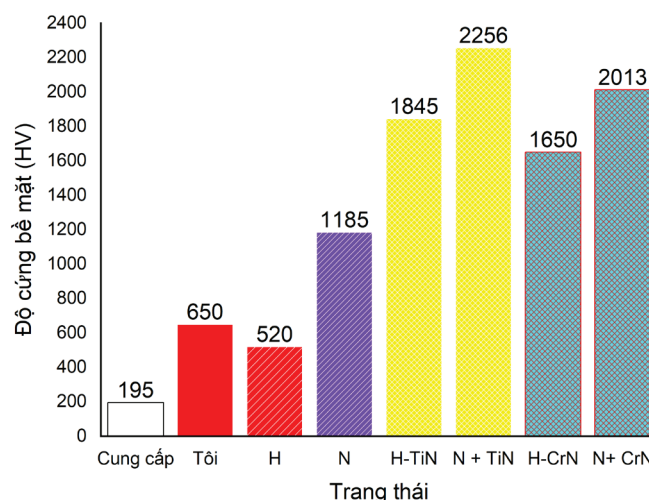
Kết quả cho thấy, các mẫu phủ theo công nghệ xử lý bề mặt kép có độ bám dính cao hơn mẫu phủ thông thường. Trong công nghệ xử lý bề mặt kép, mẫu có độ bám dính

cao do lớp thấm N như một lớp đệm làm giảm chênh lệch độ cứng (ứng suất) giữa lớp phủ độ cứng cao với nền thép nhiệt luyện độ cứng thấp như đã đề cập ở trên [8]. Theo tiêu chuẩn VDI 3198, độ bám dính của H-CrN và H-TiN chỉ đạt HF6, trong khi đó, độ cứng mẫu phủ kép N-CrN và N-TiN đạt giá trị khoảng HF2-HF3.

3.4. Hệ số ma sát

Khả năng chống mài mòn đặc trưng cho khả năng chống mất mát về khối lượng (bên ngoài bề mặt) dưới tác động cơ học bên ngoài. Thông thường, một vật liệu có độ cứng bề mặt cao thì cũng có khả năng chống mài mòn cao. Hệ số ma sát và tốc độ mài mòn thường được sử dụng để đánh giá khả năng chống mài mòn của một vật liệu. Tốc độ mài mòn được xác định theo sự hao mòn khối lượng hoặc thể tích mất mát trong thí nghiệm kiểm tra mài mòn. Đối với lớp phủ mỏng chỉ dày một vài μm, việc xác định chính xác khối lượng vật liệu bị mất mát hoặc thể tích bị mòn rất khó thực hiện và sai số trong phương pháp lớn. Thay vào đó, hệ số ma sát được các nhà nghiên cứu lớp phủ mỏng sử dụng để đánh giá khả năng chống mài mòn của lớp phủ. Vật liệu có khả năng chống mài mòn tốt nếu có hệ số ma sát nhỏ. Hệ số ma sát được xác định trực tiếp trên máy đo, do đó, phản ánh được quá trình mài mòn của bề mặt vật liệu trong thí nghiệm kiểm tra mài mòn.

Kết quả của thí nghiệm kiểm tra mài mòn bi trên mặt phẳng (ball on flat) được thể hiện trong hình 6. Từ kết quả thực nghiệm có thể thấy, hệ số ma sát tỷ lệ nghịch với độ cứng trên bề mặt mẫu. Các mẫu xử lý bề mặt kép có hệ số ma sát chỉ khoảng 0,2 so với mẫu thấm N (0,356) và nhiệt luyện (0,555). Hệ số ma sát của các mẫu tỷ lệ nghịch với độ cứng tế vi đo được.



Hình 6. Kết quả xác định hệ số ma sát mẫu thép ở các trạng thái xử lý bề mặt khác nhau.

Một điểm đáng chú ý là hệ số ma sát mẫu phủ PVD trên nền nhiệt luyện H-CrN (0,236) và H-TiN (0,215) có hệ số ma sát lớn hơn so với mẫu phủ kép tương ứng N-CrN (0,204) và N-TiN (0,195). Nguyên nhân có thể giải thích là do mẫu phủ trên nền nhiệt luyện có độ bám dính kém, trong quá trình thử ma sát, lớp phủ có thể bị bong tróc ra làm tăng độ nhấp nhô trên bề mặt tiếp xúc. Ngoài ra, lớp phủ bong tróc, vỡ có thể đóng vai trò là hạt mài và chuyển cơ chế mòn dính (adhesive wear) thành mòn hạt mài (abrasive wear). Mẫu phủ TiN trên cả nền nhiệt luyện và thấm N đều có hệ số ma sát nhỏ hơn mẫu phủ CrN trên nền tương ứng. Nguyên nhân được giải thích do hai mẫu phủ có độ bám dính với nền tương đương nhau trên cùng một loại nền (HF6 với nền H và HF2-HF3 với nền N), trong khi cả hai mẫu phủ TiN đều có độ cứng cao hơn mẫu phủ CrN trên cùng nền tương ứng.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo thành công mẫu phủ theo công nghệ duplex, cấu trúc mẫu theo mặt cắt ngang gồm có lớp phủ TiN và CrN có chiều dày khoảng 2 μm , lớp thấm N có chiều dày khoảng 90 μm , trong cùng là nền thép SKD61 sau nhiệt luyện.

Công nghệ xử lý bề mặt duplex là một giải pháp để nâng cao độ bám dính, khả năng chống mài mòn (hệ số ma sát nhỏ) hơn so với công nghệ phủ truyền thống. Độ bám dính của cả hai lớp phủ TiN và CrN trên nền thép thấm N đạt giá trị HF2-HF3, trong khi đó độ bám dính tương ứng trên nền nhiệt luyện chỉ đạt HF6. Hệ số ma sát đo trên bề mặt mẫu phủ theo công nghệ duplex chỉ khoảng 0,2, so với hệ số ma sát mẫu H-TiN và H-CrN lần lượt là 0,215 và 0,202. Độ bám và khả năng chống mài mòn cao của lớp phủ Duplex được giải thích do sự hỗ trợ của lớp thấm N làm giảm chênh lệch ứng suất của lớp phủ so với nền thép nhiệt luyện.

Trong nghiên cứu này, lớp phủ TiN có độ cứng cao hơn lớp phủ CrN trên cả nền thép nhiệt luyện H và thấm N. Trong khi đó, không có sự khác biệt giữa độ bám dính của hai lớp phủ trên cùng một loại nền (H hoặc N).

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện từ nhiệm vụ cấp Bộ Khoa học và Công nghệ: “Nghiên cứu chế tạo thiết bị và xây dựng quy trình công nghệ thấm nitơ thể khí trong chân không hoàn thiện công nghệ Duplex”. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Randhawa (1988), “Cathodic arc plasma deposition”, *Thin Solid Films*, **167(1-2)**, pp.175-185, DOI: 10.1016/0040-6090(88)90494-4.
- [2] S.S. Kim, J.G. Han, S.Y. Lee (1998), “Deposition behaviours of CrN films on the edge area by cathodic arc plasma deposition process”, *Thin Solid Films*, **334(1-2)**, pp.133-139, DOI: 10.1016/S0040-6090(98)01131-6.
- [3] H. Olia, R.E. Kahrizsang, F. Ashrafizadeh, et al. (2019), “Corrosion study of TiN, TiAlN and CrN multilayer coatings deposit on martensitic stainless steel by arc cathodic physical vapour deposition”, *Materials Research Express*, **6(4)**, DOI: 10.1088/2053-1591/aaff11.
- [4] P.C. Johnson, H. Randhawa (1987), “Zirconium nitride films prepared by cathodic arc plasma deposition process”, *Surface and Coatings Technology*, **33**, pp.53-62, DOI: 10.1016/0257-8972(87)90176-9.
- [5] W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, et al. (2019), “Tribomechanical behaviour of TiAlN and CrAlN coatings deposited onto AISI H11 with different pre-treatments”, *Coatings*, **9(8)**, DOI: 10.3390/coatings9080519.
- [6] J.J. Moore, D. Zhong (2003), *Advanced Coatings for Structural Materials Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, Elsevier, Oxford, pp.1-12, DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01887-8.
- [7] C. Ruset, E. Grigore, T. Glaser, et al. (2007), “Combined treatments - A way to improve surface performances”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **9(6)**, pp.1637-1644.
- [8] M. Zlatanović (2003), “Combined plasma surface treatments for wear and corrosion protection”, *Tribology in Industry*, **25(3-4)**, pp.65-70.
- [9] D.T. Binh, L.T. Chung, N.T.P. Mai, et al. (2017), “Manufacturing TiN hard coating by cathodic arc method, applied on aluminium alloy pressure casting mold to produce hug ring details”, *Journal of Military Science and Technology Research*, pp.194-204 (in Vietnamese).
- [10] N. Vidakis, A. Antoniadis, N. Bilalis (2003), “The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds”, *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**, pp.481-485, DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00300-5.
- [11] G. Bertrand, H. Mahdjoub, C. Meunier (2000), “A study of the corrosion behaviour and protective quality of sputtered chromium nitride coatings”, *Surface and Coatings Technology*, **126(2-3)**, pp.199-209, DOI: 10.1016/S0257-8972(00)00527-2.