

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THẨM NITƠ PLASMA ĐẾN TỔ CHỨC TẾ VI VÀ ĐỘ CỨNG CỦA THÉP KHÔNG GỈ 304

A STUDY ON THE EFFECT OF PLASMA NITRIDING ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF 304 STAINLESS STEEL

Hoàng Anh Tuấn¹, Vũ Anh Tuấn^{2*}, Hoàng Anh Tuấn³

¹Trường Đại học Công nghệ Đồng Nai, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam

²Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Lê Chân, Hải Phòng, Việt Nam

³Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Đông Ngạc, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: anhtuan.cscb@vimaru.edu.vn

(Nhận bài / Received: 17/10/2024; Sửa bài / Revised: 15/12/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 24/12/2024)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.447

Tóm tắt - Trong nghiên cứu này, mẫu thép không gỉ 304 được thẩm nitơ plasma ở nhiệt độ 530°C trong thời gian 4,5h. Mẫu sau thẩm được tiến hành quan sát tổ chức, đo độ cứng tế vi. Kết quả cho thấy, bề mặt mẫu có độ cứng cao (756HV) và độ cứng có xu hướng giảm dần từ ngoài vào lõi (360HV) với chiều sâu lớp nitrit là khoảng 10µm và chiều sâu lớp thẩm đạt được khoảng 30µm. Đường phân bố độ cứng cho thấy, sự đồng đều từ lớp bề mặt vào trong lõi của thép sau thẩm. Phân tích về tổ chức tế vi cho thấy, chất lượng lớp thẩm đồng đều trên bề mặt mẫu thép không gỉ 304. Ngoài ra, tổ chức tế vi sau thẩm xuất hiện lớp sẫm màu phân bố đều trên bề mặt của thép, đây chính là lớp nitrit của Cr và Fe với mật độ sít chặt cao và đồng đều trên tiết diện, do đó làm cho thép có độ cứng cao, dẫn đến tăng khả năng chống mài mòn.

Từ khóa - Nitrit; độ cứng; khả năng chống mài mòn; thẩm nitơ plasma; thép không gỉ 304.

1. Đặt vấn đề

Thép không gỉ là vật liệu được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực dân dụng và trong công nghiệp. Tính chịu ăn mòn vốn có của thép không gỉ là nhờ sự có mặt của nguyên tố Crom (Cr) vì Cr tạo ra lớp oxit ổn định che phủ bề mặt nhằm bảo vệ thép. Trong số các loại thép không gỉ, thép 304 (theo tiêu chuẩn UNS) là loại thép phổ biến, chiếm 50% sản lượng thép không gỉ trên thế giới [1]–[4]. Thép 304 có hàm lượng Cr khoảng 18-20%, Ni 8-10%, tổ chức một pha autennit, có tính chống ăn mòn tốt, nhưng có độ cứng và tính chống mài mòn thấp do hàm lượng các bon thấp (<0,08%). Vì tính chống mài mòn thấp nên các chi tiết làm bằng vật liệu thép 304 thường bị giảm tuổi thọ khi làm việc trong môi trường chịu cả ăn mòn và mài mòn. Do vậy, việc tăng tính chống mài mòn cho thép 304 trong môi trường chịu cả ăn mòn và mài mòn là một nhu cầu cần thiết.

Có nhiều giải pháp để tăng cường tính chống mài mòn cho thép không gỉ. Trên thế giới, việc nghiên cứu và áp dụng phương pháp thẩm nitơ plasma lên thép không gỉ đã thực hiện từ thế kỷ trước. Tuy nhiên, việc nghiên cứu và áp dụng phương pháp này hiện còn rất mới mẻ ở Việt Nam. Trong quá trình thẩm nitơ (N₂) plasma, N₂ bị ion hóa

Abstract - In this study, 304 stainless steel samples were plasma-nitrided at 530°C for 4.5 hours. The microstructure and microhardness of sample after nitriding were measured. The results showed that the surface of steel sample had a high hardness (756HV), which tended to decrease from the surface to the core (360HV) with a nitride layer depth of about 10µm and a nitriding layer depth of about 30µm. The hardness distribution showed uniformity from the surface layer to the core of the steel after nitriding. The microstructure analysis indicated that the quality of the nitriding layer was uniform on the surface of the 304 stainless steel sample. In addition, the post-nitriding microstructure included a dark layer evenly distributed on the surface, which is the nitride layer of Cr and Fe with high density and uniformity over the cross-section, thus making the steel sample possess high hardness, leading to increased wear resistance.

Key words - Nitriding; hardness; wear resistance; plasma nitriding; 304 stainless steel.

theo phản ứng $N_2 = 2N^+ + 2e^-$ tạo ra ion nitơ kết hợp với nguyên tử các nguyên tố có ái lực với nitơ tạo các nitrit được hấp phụ lên bề mặt chi tiết, một phần trong số đó do không bền vững bị phân hủy và tạo thành các pha CrN, Fe₃N bền vững hơn và nguyên tử nitơ. Các nguyên tử nitơ này khuếch tán vào bên trong và tạo thành lớp thẩm tăng cứng cho bề mặt chi tiết dựa trên các kết quả thẩm nitơ cho loại thép này, có thể mở rộng ứng dụng của chúng trong việc chế tạo các trục bơm, cánh khuấy trong công nghiệp thực phẩm, trục xe sợi tổng hợp chịu mài mòn, dao cắt vải... làm tăng tuổi thọ làm việc của các chi tiết máy lên nhiều lần [5]–[8]. Theo nghiên cứu của Dayanç và cộng sự về thẩm nitơ plasma lên gang xám để chế tạo các chi tiết dạng trục, họ đã xác định được độ cứng và chiều sâu lớp thẩm. Chiều sâu lớp thẩm có thể đạt tới 603µm, độ dày lớp thẩm đạt tới 10µm, và độ cứng ở lớp bề mặt đạt được là 583 HV [9]. Nghiên cứu của Singh và cộng sự đã xác định được tổ chức tế vi và độ cứng của lớp thẩm nitơ bằng phương pháp plasma cho thép 316L [10]. Bằng phân tích XRD các tác giả cũng đã xác định được sự hình thành các pha trong tổ chức của thép 316L. Ảnh hưởng của thẩm nitơ plasma đến tổ chức tế vi và tính chất của thép 304 cũng được chỉ ra trong một số nghiên cứu khác

¹ Dong Nai Technology University, Bien Hoa City, Dong Nai, Vietnam (Hoàng Anh Tuấn)

² Vietnam Maritime University, Le Chan, Hai Phong, Vietnam (Vu Anh Tuan)

³ General Department of Defense Industry, Dong Ngac, Bac Tu Liem, Ha Noi, Vietnam (Hoàng Anh Tuấn)

[11]–[14]. Các nghiên cứu này tập trung vào đánh giá ảnh hưởng của thấm nitơ đến tính chống mài mòn và ăn mòn của thép cũng như đến tổ chức và độ cứng tế vi của thép không gỉ 304.

Plasma là trạng thái của chất khí khi bị ion hóa một phần hoặc toàn phần, bao gồm có các nguyên tử (hoặc phân tử) trung hòa điện và các hạt mang điện là các ion và electron. Đặc tính của plasma là giải trung hòa: tổng các điện tích âm và dương được tạo ra gần như bằng nhau, số lượng các nguyên tử bị ion hóa nhiều hơn số lượng các ion tái hợp. Như vậy, plasma là chất khí dẫn điện. Phương pháp tạo plasma điển hình nhất là phương pháp dựa trên sự phóng điện phát sáng trong pha khí (Hình 1).

hường của phương pháp thấm nitơ plasma lên tổ chức và độ cứng của thép không gỉ 304.

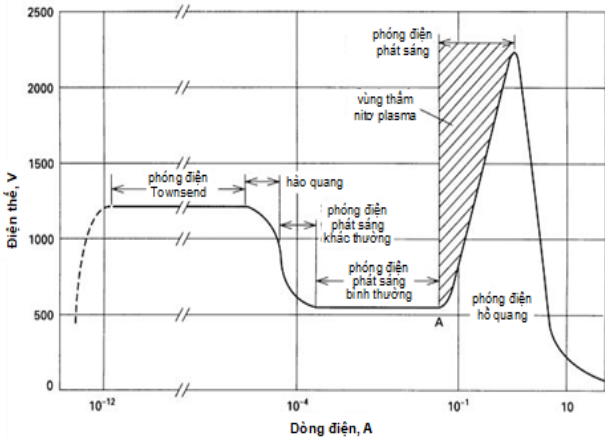
2. Mô hình thực nghiệm

Mẫu thép thấm 304 có hình trụ đường kính 14mm và chiều cao 5mm có thành phần hóa học như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu thép 304

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0,0368	0,2697	1,5623	0,0259	0,0066	18,9382	9,8572	0,5152	0,622

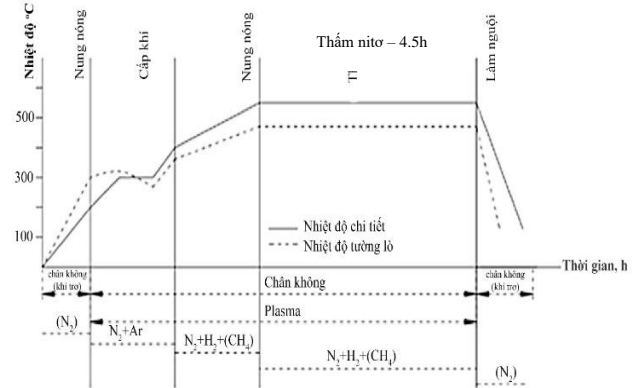
Trong công trình này, quá trình thấm nitơ được thực hiện trong lò thấm plasma trong thời gian 4,5h ở nhiệt độ 530°C, điện áp 470V, tỉ lệ H₂: N₂ = 1:3. áp suất 667Pa, quy trình thấm được thực hiện như Hình 2.



Hình 1. Các kiểu phóng điện khác nhau trong môi trường khí argon [5]

Hiện tượng phóng điện phát sáng quanh các chi tiết gia công tích điện âm (catôt) hình thành ở điện áp 500÷1000 V với áp suất khí 1÷10 torr (Hình 1). Dưới tác dụng của điện trường, các electron bị bứt ra khỏi bề mặt kim loại catot và di chuyển tới anôt theo cơ chế tự phát. Các electron này va chạm với các phân tử khí, ở đây là khí nitơ, tạo ra các ion nitơ và các electron mới. Các electron sinh ra trong khoảng không gian giữa hai điện cực, trong bước chuyển động tự do trước khi va chạm với phân tử khí, tích tụ đủ năng lượng để ion hóa phân tử nitơ và tạo thêm electron tự do mới. Theo đó xảy ra phản ứng dây chuyền nhân bản electron và hình thành dòng điện. Đó là dòng các electron di chuyển đến bề mặt anôt và dòng ion nitơ di chuyển theo hướng ngược lại đến bề mặt catôt. Như vậy, quá trình ion hóa trong plasma của chất khí có quan hệ trực tiếp tới việc hình thành dòng điện đi qua và có tính chất thác lũ ion hóa. Sau đó trong một khoảng cách ngắn quanh chi tiết gia công, ion nitơ tích điện dương nhận một điện tử từ catot (chi tiết gia công) và vì vậy phát ra một photon.

Từ các kết quả nghiên cứu đã trình bày ở trên về quá trình thấm nitơ plasma. Các nghiên cứu đã có chỉ ra về ảnh hưởng của lớp thấm đến tổ chức và tính chất của thép nhưng chưa thấy có sự phân tích về quá trình hình thành lớp thấm và độ cứng tế vi của thép 304L cũng như phân tích thành phần các nguyên tố trên bề mặt lớp thấm và so sánh tổ chức tế vi với phương pháp thấm truyền thống. Do đó, bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu về ảnh



Hình 2. Quy trình thấm Nitơ plasma

Chiều dày lớp thấm, tổ chức tế vi được đo và quan sát trên kính hiển vi quang học Axiovert 100A. Độ cứng tế vi của lớp thấm đo trên máy đo độ cứng Stuers Duramin, tải trọng đo 10 Gr.

3. Kết quả và thảo luận

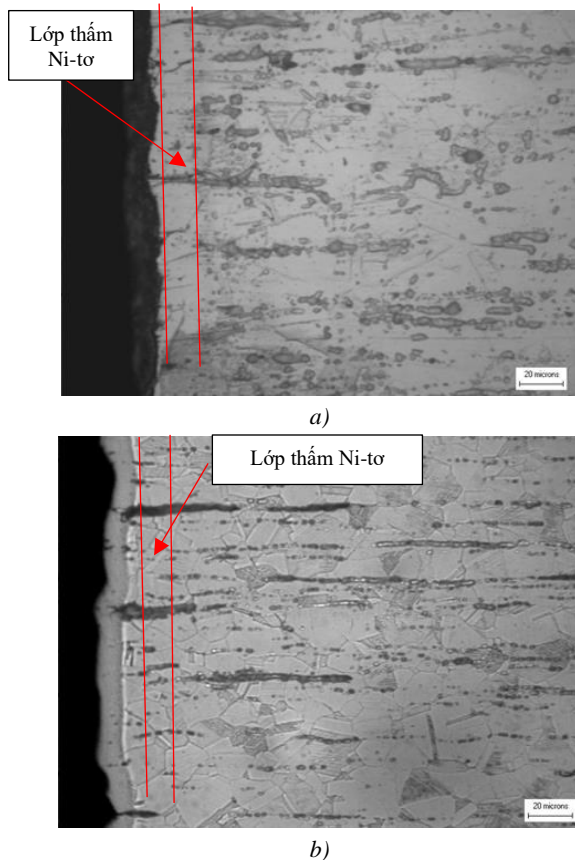
3.1. Đặc điểm cấu tạo lớp thấm

Hình 3 trình bày tổ chức tế vi của lớp thấm thu được từ thép 304. Quan sát thấy một lớp đen liên tục trên bề mặt, khoảng (10-12) μm khi thấm bằng phương pháp nitơ plasma. Bên cạnh đó, tổ chức nền bên trong trong thép là austenit. Có thể phán đoán rằng nitơ kết hợp với các nguyên tố có trong nền thép tạo các pha hóa bền nitrit, hình thành lớp đen ở bề mặt và phân bố gián đoạn ở dạng hạt mịn hay dung dịch rắn khí khuếch tán vào sâu bên trong lõi. Những kết quả này phù hợp với những kết quả về mặt lý thuyết về thấm nitơ plasma đã được trình bày ở các công trình đã được công bố trước đây [5], [14], [16], [17].

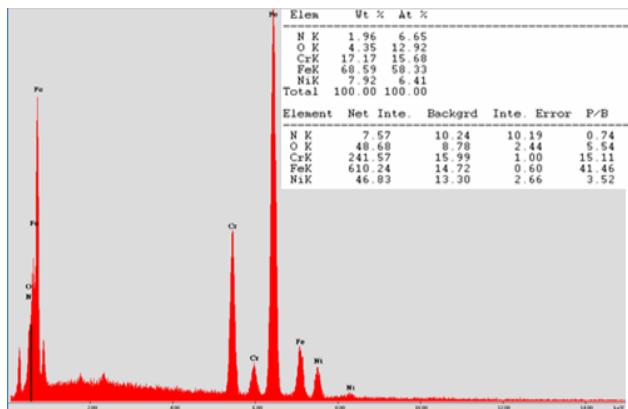
Quan sát ảnh tổ chức khi thấm bằng hai phương pháp này cho thấy chất lượng lớp thấm plasma đồng đều hơn và không có giải phân cách giữa lớp thấm và nền. Do nhiệt độ thấm thấp; môi trường hình thành lớp thấm ổn định kết hợp với nguồn nhiệt plasma đảm bảo được tính đồng đều về tổ chức của lớp thấm. Trên bề mặt chi tiết lớp nitrit có kích thước đều và ổn định trên tiết diện của mẫu. Việc hình thành một lớp thấm đồng đều sẽ tăng được khả năng chống mài mòn cũng như khả năng chống ăn mòn (đặc trưng của các nitrit) cho thép nghiên cứu [9], [18]–[24]. Tuy nhiên trên ảnh tổ chức tế vi với độ phóng đại 500 lần

không quan sát được sự có mặt các nitrit. Điều đó chứng tỏ rằng các pha rất nhỏ mịn, và không thể quan sát được với độ phóng đại trên.

Sau khi thấm bằng phương pháp plasma, tổ chức tế vi mẫu cho thấy lớp thấm bên ngoài sau tâm thực có màu sẫm khác với màu trắng của thấm thể khí cho thấy sự khác nhau về thành phần lớp thấm. Đó chính là các CrN đã kết tụ trên bề mặt mẫu. Thật vậy, khi thấm ở nhiệt độ trên 500°C, CrN hình thành dễ dàng hơn so với các nitrit sắt [5]. Mật độ CrN hình thành trong lớp thấm lớn hơn với thấm thể khí. Do đó, tổ chức nền bên trong của thép hầu như không thay đổi ở các chế độ thấm. Kết quả phân tích EDX trên Hình 4 cho thấy một cách rõ ràng là có sự xuất hiện của nitơ trong mẫu sau thấm nitơ plasma.



Hình 3. Tổ chức lớp thấm 304 độ phóng đại 500 lần, a) Thấm nitơ truyền thống, b) Thấm nitơ plasma



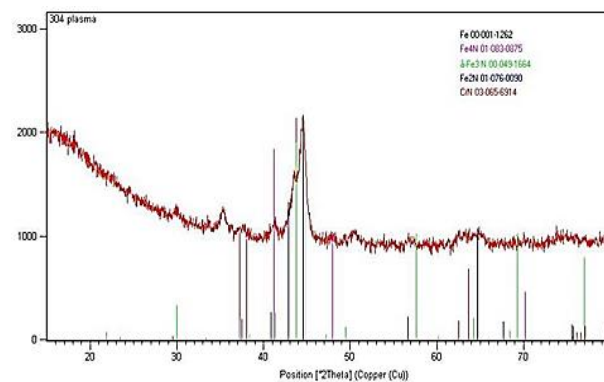
Hình 4. Kết quả phân tích EDX thành phần lớp thấm Nitơ thép 304 thấm ni-tơ plasma

Phân tích từ gián đồ nhiễu xạ EDX (Hình 4 và Bảng 2) cho thấy có sự xuất hiện của các peak nitơ. Kết quả phân tích EDX cho thấy hàm lượng nitơ trong lớp thấm là 1,9% khối lượng hay tương đương với 6,65% số nguyên tử. Hàm lượng nguyên tố nitơ khá cao dẫn đến tạo lớp trắng trên bề mặt mẫu thép thử nghiệm.

Bảng 2. Thành phần lớp thấm Nitơ thép 304 thấm nitơ plasma

Nguyên tố	% Khối lượng	% Nguyên tử
N K	1,96	6,65
O K	4,35	12,92
Cr K	17,17	15,68
FeK	68,59	58,33
NiK	7,92	6,41
Tổng	100,00	100,00

Gián đồ nhiễu xạ Rongen (Hình 5) của phương pháp thấm nitơ plasma có thấy xuất hiện các peak của các pha CrN, Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N trong trong lớp thấm. Cường độ của các peak khác nhau, cho thấy, sự phân bố và mật độ của các pha trong lớp thấm khác nhau. Với thấm plasma chủ yếu là CrN, không thấy peak của Cr₂N. Những kết quả nghiên cứu về sự hình thành nitrit ở trên lớp bề mặt của thép không gỉ cũng như sự hình thành pha γ' là phù hợp với các kết quả nghiên cứu của một số tác giả trên thế giới khi thực hiện nghiên cứu về thấm ni-tơ cho thép không gỉ 304 [13], thép 17-4PH [25] hay thép không gỉ 316L [26]. Các kết quả nghiên cứu này cũng chỉ ra sự hình thành các pha CrN, Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N ở trên bề mặt lớp thấm cũng như sự hình thành dung dịch rắn γ' . Điều này cho thấy, sự tương đồng về kết quả nghiên cứu của tác giả cũng như các công bố khác khi nghiên cứu về thấm ni-tơ plasma cho thép đặc biệt là thép không gỉ.



Hình 5. Phân tích Xray lớp thấm nitơ plasma thép 304

3.2. Độ cứng

Khi tiến hành xác định độ cứng mẫu trước và sau khi thấm ta thu được kết quả như sau:

Trước khi thấm:

+ Có nhiệt luyện: 229HB (20HRC);

+ Không nhiệt luyện: 255HB (25HRC).

Sau khi thấm, độ cứng của thép theo chiều sâu lớp thấm được trình bày trong Bảng 3.

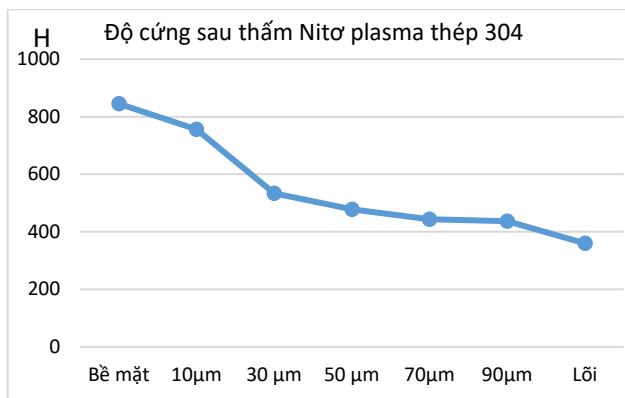
Đồ thị phân bố độ cứng lớp thấm (Hình 6) cho thấy, lớp bề mặt của thép 304 sau khi thấm bằng phương pháp plasma cho độ cứng rất cao (756HV), cao hơn so với thấm thể khí khoảng 196HV (thấm truyền thống là

560HV). Kết quả độ cứng cho thấy có lớp trắng rất mỏng khoảng 10 μ m. Độ cứng lớp và chất lượng lớp bề mặt như vậy có vai trò rất tốt cho quá trình chống mài mòn của chi tiết, làm việc trong điều kiện chủ yếu là do các

hạt mài. Các kết quả đánh giá về độ cứng của thép không gỉ sau khi thấm nitơ plasma có sự tương đồng về sự phân bố độ cứng với các kết quả công bố trước đây [9], [20], [26]–[28].

Bảng 3. Độ cứng theo chiều sâu lớp thấm nitơ plasma của thép 304

Loại thép	Bề mặt	10 μ m		30 μ m		50 μ m		70 μ m		90 μ m		Lõi	
	HV	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
304		560	53,0	511	49,8	453	45,5	434	44,0	399	40,7	377	38,5
304NL	845	756	62,3	534	51,3	478	47,5	443	44,7	437	44,2	360	36,6



Hình 6. Phân bố độ cứng tế vi thép 304 sau thấm Nitơ plasma

4. Kết luận

Phương pháp thấm nitơ plasma cho thép không gỉ 304 có thể tạo lớp thấm nitơ có cơ tính tốt hơn so với phương pháp truyền thống, có thể điều chỉnh được thành phần lớp thấm, thời gian thấm nhanh, hiệu quả cao. Ngoài ra, chi tiết khi thấm bằng phương pháp plasma không bị biến dạng như các phương pháp khác. Bề mặt chi tiết khi thấm bằng phương pháp plasma có độ cứng cao nên khả năng chống mài mòn được cải thiện rõ rệt. Với thép không gỉ 304, lớp thấm có độ cứng 55-60HRC so với nền có độ cứng 25-30HRC. Điều này giúp tăng tuổi thọ chi tiết khi làm việc trong điều kiện chịu mài mòn. Các kết quả của nghiên cứu này mở ra một hướng mới cho việc nghiên cứu, ứng dụng và phát triển công nghệ thấm nitơ plasma nhằm nâng cao tính chống mài mòn và cải thiện tổ chức tế vi của thép so với phương pháp truyền thống. Các kết quả nghiên cứu về sự hình thành pha đã chứng minh được sự xuất hiện của các pha nitrit CrN, Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N cũng như sự hình thành dung dịch rắn γ' ở trong thép không gỉ 304.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. H. Lo, C. H. Shek, and J. K. L. Lai, "Recent developments in stainless steels", *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 65, no. 4-6, pp. 39-104, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>.
- [2] W. Ahmed, A. Elhissi, M. J. Jackson, and E. Ahmed, "Precision machining of medical devices", *The Design and Manufacture of Medical Devices*, 1st edition. Elsevier, 2012. <https://doi.org/10.1533/9781908818188.59>.
- [3] R. Francis and G. Byrne, "Duplex stainless steels-alloys for the 21st century", *Metals*, vol. 11, no. 5, pp. 836-859, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11050836>.
- [4] R. Hübler, A. Cozza, T. L. Marcondes, R. B. Souza, and F. F. Fiori, "Wear and corrosion protection of 316-L femoral implants by deposition of thin films", *Surface and Coatings Technology*, vol. 142-144, pp. 1078-1083, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01321-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01321-4).
- [5] C. H. Knerr, T. C. Rose, and J. H. Filkowski, "ASM Handbook", 4th edition ASM International, 1991.
- [6] V. I. Gryzunov, E. Y. Priymak, N. V. Firsova, and T. V. Emel'Yanova, "Kinetic aspects of formation of carbonitride layer", *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 59, no. 3-4, pp. 186-189, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0126-9>.
- [7] I. Zumbilev and A. Zumbilev, "On the influence of ion carbonitriding on the wear resistance of materials", *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol. 26, no. 4, pp.653, 2020.
- [8] W. Dal'Maz Silva *et al.*, "Carbonitriding of low alloy steels: Mechanical and metallurgical responses", *Materials Science and Engineering A*, vol. 693, pp. 225-232, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.077>.
- [9] A. Dayanç, B. Karaca, and L. C. Kumruoğlu, "Plasma nitriding process of cast camshaft to improve wear resistance", *Acta Phys. Pol. A*, vol. 135, no. 4, pp. 793-799, 2019, doi: 10.12693/APhysPolA.135.793.
- [10] A. Singh *et al.*, "Performance evaluation of plasma nitrided 316L stainless steel during long term high temperature sodium exposure", *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1468-1475, 2023, doi: 10.1016/j.net.2022.12.019.
- [11] T. Peng and L. Wang, "Effect of nitriding temperature and its effects on the corrosion and wear resistance of 304 austenitic stainless steel", *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 11, no. 3, pp. 035014, 2023, doi: 10.1088/2051-672X/acf235.
- [12] M. Slezák, M. Uhrčík, P. Palček, V. Chvalníková, P. Drámalová, and L. Šikyňa, "Effect of Plasma Nitriding and Sensitization on the Microstructure and Microhardness of AISI 304 Austenitic Steel", *Manuf. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 909-916, 2023, doi: 10.21062/MFT.2023.087.
- [13] P. Ravi Kumar *et al.*, "Effects of Plasma Nitriding Process on AISI 304 Stainless Steel", in *E3S Web of Conferences*, vol. 391, pp. 1-7, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202339101110.
- [14] Y. Sun, T. Bell, Z. Kolosvary, and J. Flis, "The response of austenitic stainless steels to low-temperature plasma nitriding", in *Stainless Steel*, CRC Press, 2020.
- [15] R. Xu *et al.*, "Development of metal-doping mesoporous biochar catalyst for co-valorizing biomass and plastic waste into valuable hydrocarbons, syngas, and carbons", *Fuel Process. Technol.*, vol. 227, p. 107127, 2022, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107127.
- [16] J. Davis, "Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics.", 1st edition. ASM International, 2002.
- [17] X. Fan, J. Huang, Q. Yang, and J. Gand, "Plasma electrolytic carbonitriding of 20CrMnTi steel", in *Advanced Materials Research*, vol. 154-155, pp. 1393-1396, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.1393>.
- [18] S.-G. Kim, K.-H. Yeo, Y.-K. Cho, J.-H. Lee, and M. Okumiya, "The Phenomenon of High Hardness Values on the S-Phase Layer of Austenitic Stainless Steel via Screen Plasma Nitriding Process", *Advances in Materials Physics and Chemistry*, vol. 8, no. 6, pp. 257-268, 2018. <https://doi.org/10.4236/ampc.2018.86017>.

- [19] D. Kovács, I. Quintana, and J. Dobránszky, "Effects of Different Variants of Plasma Nitriding on the Properties of the Nitrided Layer", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, no. 9, pp. 5485–5493, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04292-9>.
- [20] S. E. Oltean and M. Dulău, "Design and Simulation of Fuzzy Logic Based Temperature Control for a Plasma Nitriding Process", *Procedia Technology*, vol. 19, pp. 569-575, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.081>.
- [21] A. G. Poshtahani, S. Roostaie, and M. Azadi, "Plasma nitriding effect on tribological and corrosion properties of Stellite 6 and 12 PTA weld clad hardfaced on stainless steel 410", *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 11, pp. 100108, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100108>.
- [22] M. Sonugelen, U. I. Destan, F. Y. Lambrecht, B. Öztürk, and S. Karadeniz, "Microbial adherence to a nonprecious alloy after plasma nitriding process", *International Journal of Prosthodontics*, vol. 19, no. 2, pp. 202, 2006.
- [23] A. Ari, "Effect of Plasma Nitriding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of DIN 1.2367 Hot Work Tool Steel", *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, vol. 7, no. 6, pp. 12-22, 2023. <https://doi.org/10.59287/ijanser.1141>.
- [24] A. Bernal, "Investigation on Nitriding with Emphasis in Plasma Nitriding Process, Current, Technology and Equipment", *Mater. Process.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2006.
- [25] Z. Han *et al.*, "Composition, microstructure, and phase evolution of 17-4PH stainless steel with a work-hardened layer in the low-temperature plasma nitriding process", *Surface and Coatings Technology*, vol. 451, pp. 128950, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128950>.
- [26] M. Yazıcı, O. Çomaklı, T. Yetim, A. F. Yetim, and A. Çelik, "Investigation of mechanical, tribological and magnetic properties after plasma nitriding of AISI 316L stainless steel produced with different orientations angles by selective laser melting", *Surface and Coatings Technology*, vol. 467, pp. 129676, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129676>.
- [27] M. H. Farazmand, H. Khorsand, and H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, "The Effect of the Plasma-Nitriding Process on the Structure and Wear Properties of the Sintered Low Alloy Steel", *Metallogr. Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 7, no. 6, pp. 711-723, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0487-5>.
- [28] R. C. Shivamurthy, M. Kamaraj, R. Nagarajan, S. M. Shariff, and G. Padmanabham, "Laser surface modification of steel for slurry erosion resistance in power plants", *Laser Surface Modification of Alloys for Corrosion and Erosion Resistance*, 1st edition. Elsevier, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857095831.2.177>.