

ẢNH HƯỞNG CỦA LỚP THẨM NITƠ ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG MÀI MÒN VÀ ẪN MÒN CỦA GANG CRÔM CAO**THE EFFECT OF NITRIDED LAYER ON THE ABRASION AND CORROSION RESISTANCE OF HIGH CHROMIUM CAST IRON****LÊ THỊ NHUNG**

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: nhunglt.vck@vamaru.edu.vn**Tóm tắt**

Bài báo này sẽ thảo luận về ảnh hưởng của thẩm nitơ tới tổ chức và tính chất của gang 300Cr18Mn3. Các mẫu được tôi và ram trước khi tiến hành thẩm. Sau mỗi chế độ xử lý, mẫu được phân tích trên kính hiển vi quang học, EDS, Xray, đo độ cứng, đo độ mài và đo mức độ ăn mòn. Kết quả thu được cho thấy, khả năng chống mài mòn trong điều kiện thử nghiệm của gang hợp kim sau khi thẩm tăng lên một cách rõ rệt so với mẫu không thẩm (độ mài mòn trước khi thẩm là 5 μ m, sau khi thẩm là 0 μ m). Bên cạnh đó, khả năng chống ăn mòn của mẫu sau khi thẩm tăng trên 4 lần. Trên bề mặt của mẫu sau khi thẩm xuất hiện một là dải nitrit liên tục với độ cứng lên tới 1114HV.

Từ khóa: Gang crôm, thẩm nitơ, lớp thẩm, tổ chức tế vi, ăn mòn, mài mòn.

Abstract

This paper discusses the effect of nitriding on the microstructure and properties of 300Mn18Cr3 cast iron. The samples were quenched and tempered before nitriding. After heat treatment, the samples were analyzed by using optical microscope, EDX, Xray, hardness measurement, and abrasion and corrosion tests. The results indicate that the abrasion resistance of sample after nitriding increases significantly by comparing to the initial ones (abrasion values are 5 μ m and 0 μ m, respectively). Furthermore, the corrosion resistance also increases more than 4 times. It can be observed a nitrite layer on the surface after nitriding with 1114HV hardness.

Keywords: Chromium cast iron, nitriding, nitrided layer, microstructure, abrasion, corrosion.

1. Mở đầu

Hợp kim gang crôm cao đang ngày càng được sử dụng rộng rãi để chế tạo các chi tiết chống mài mòn như đầu búa đập nghiền hoặc các chi tiết máy nghiền quặng, máy phun bi... Theo các nghiên cứu trong nước đã chỉ rõ, ưu điểm của loại vật liệu này là tính đúc tốt, khả năng chịu va đập, đặc biệt là tính chống mài mòn và chịu mỏi tốt hơn so với các loại gang khác [1, 2, 3]. Khả năng chống mài mòn của hợp kim gang crôm cao là do sự hiện diện của cacbit M7C3, độ cứng vào khoảng 1200HV, nằm trên nền mactenxit và austenit dư kết hợp với sự hòa tan của crôm vào kim loại nền [4, 5, 6]. Đối với các chi tiết máy làm việc trong điều kiện chịu mài mòn mạnh thì việc tìm hiểu nguyên nhân và cơ chế của quá trình mài mòn bề mặt có vai trò vô cùng quan trọng. Một số nghiên cứu đã đi sâu vào sự thay đổi tổ chức pha, cơ tính của lớp bề mặt và đưa ra cơ chế mài mòn của gang đối với từng loại mài mòn [7-10]. Riahi và Alpas [11] tiến hành xây dựng biểu đồ mài mòn trượt khô đầu tiên cho gang xám, trong đó mài mòn được phân loại thành mài mòn siêu nhẹ, nhẹ và nặng. Mài mòn siêu nhẹ tương ứng với một lớp màng oxit nén chặt bao phủ các bề mặt tiếp xúc. Mài mòn nhẹ được định nghĩa là mài mòn do oxy hóa. Mài mòn nặng xuất hiện khi lớp oxit hình thành không ổn định do sự phân tách của tribo-oxit. Nhóm tác giả cũng nhận định, gang xám có khả năng chống mài mòn tốt nhất trong quá trình trượt khô khi ở điều kiện tải trọng nhẹ dẫn đến graphit bị bong ra và hình thành lớp graphit mới. Hiện nay, có rất nhiều phương pháp nâng cao khả năng chống mài mòn bề mặt của gang. Theo tài liệu [12], khi thực hiện tôi đẳng nhiệt tại 350°C cho gang dẻo sẽ hình thành lớp cacbit bề mặt giúp nâng cao khả năng chịu mài mòn, thậm chí tốt hơn so với thép Hadfield. Trong nghiên cứu [13-15], các tác giả sử dụng phương pháp phun nhiệt bằng oxy tốc độ cao (HVOF) lên gang trắng cũng thu được các kết quả khả quan. Bài báo này sẽ tập trung nghiên cứu về khả năng nâng cao tính chống mài mòn của gang bằng phương pháp thẩm nitơ.

Thẩm nitơ ra đời từ năm 1906 bởi nhà luyện kim Adolph Machlet và đã được chứng minh có tác dụng

nâng cao độ bền, khả năng chống mài mòn cho gang. Nayak và cộng sự [16] tiến hành thấm nitơ cho gang xám ở 1000-1100°C và nghiên cứu sự thay đổi tổ chức và cơ tính khi thay đổi thời gian thấm nitơ, lưu lượng của nitơ và thành phần khí thấm. Các kết quả cho thấy độ cứng của lớp bề mặt tăng gấp hai lần so với trước khi thấm. Kiểm tra độ phân giải nano cũng chỉ ra sự giảm độ dẻo bề mặt của gang. Trong nghiên cứu của X.Nie a [17], ông và cộng sự tiến hành thấm nitơ plasma trên bề mặt của gang G3500 cũng chỉ ra sự gia tăng đáng kể khả năng mài mòn cho bề mặt gang. Ngoài ra, quá trình thấm nitơ còn tăng khả năng chịu môi cho gang [18, 19, 20]. Để xây dựng đường cong môi và cơ chế phá hủy môi sau khi thấm nitơ, Konečná và cộng sự [21] đưa ra quy trình thấm có kiểm soát NitregR đối với gang dẻo Ferit EN - GJS 400. Nhóm tác giả đã chứng minh về khả năng cải thiện đáng kể phản ứng môi và xác nhận phạm vi cải thiện sau quy trình thấm. Độ bền môi cao không chỉ do sự hình thành các pha có độ cứng cao tại lớp bề mặt mà còn do sự hình thành ứng suất dư nén. Lớp ứng suất dư này hình thành bởi sự biến dạng của mạng tinh thể khi nitơ khuếch tán vào bề mặt vật liệu, dẫn tới sự thay đổi thể tích riêng của lớp bề mặt. Trong nghiên cứu của Tohrú Nobuki [22], ông tiến hành so sánh khả năng chịu môi của gang dẻo trong trường hợp thấm nitơ và thấm nitơ kèm thêm hợp kim hóa V, Al, Cr. Kết quả cho thấy khả năng chịu môi của gang trong trường hợp hợp kim hóa cao hơn so với trường hợp thấm thông thường.

Dựa trên điều kiện làm việc khắc nghiệt của các chi tiết làm bằng hợp kim gang crôm cao, các nhà khoa học đã thử nghiệm quy trình thấm nitơ lên nhóm vật liệu này và thu được các kết quả khả quan. Nitơ được bổ sung vào lớp bề mặt trong quá trình thấm giúp nâng cao độ cứng và tăng khả năng chống mài mòn do sự hình thành các nitrit phụ trong nền mactenxit sau khi nhiệt luyện [23]. Sự có mặt của mactenxit tạo thuận lợi cho sự khuếch tán của nguyên tử nitơ [24], vì nitơ dễ dàng khuếch tán qua các vị trí lỗ hổng bát diện của Fe-BCC [25]. Lớp nitrit có thể được tạo thành từ các nitrit thuộc loại ϵ -Fe₂-3N và thuộc loại γ' -Fe₄N, tạo ra sự biến dạng trong nền ferit. Độ dày của lớp nitrit trong gang trắng chứa 18% Cr vào khoảng 60-70 microns [26]. Đồng thời, quá trình thấm nitơ tạo điều kiện cho quá trình chuyển hóa cacbit M7C₃ thành cacbonitrit [27].

Bài báo này là sự tiếp nối công trình nghiên cứu của tác giả về ảnh hưởng của lớp thấm nitơ [28] lên hợp kim gang crôm cao 300Cr18Mn3. Ngoài các kết quả nghiên cứu về sự thay đổi tổ chức, độ cứng và khả

năng chịu mài mòn, tác giả sẽ tìm hiểu về khả năng chịu ăn mòn của lớp thấm nitơ trong môi trường thí nghiệm.

2. Phương pháp thực nghiệm

Mẫu 300Cr18Mn3 được cắt nhỏ dạng hình hộp có kích thước 15x15x4mm để nghiên cứu về tổ chức, tính chống mài mòn, đo độ cứng trước và sau khi thấm nitơ.

Để nghiên cứu về khả năng chống ăn mòn của vật liệu trước và sau khi thấm, mẫu được cắt thành dạng hình trụ có đường kính 4mm và chiều dài 15mm.

Trước khi thực hiện quá trình thấm, các mẫu được tôi và ram cao với quy trình nhiệt luyện như sau: Mẫu hợp kim gang được nung lên đến 920°C, giữ nhiệt trong 30 phút và nguội trong không khí. Sau đó mẫu được nung tiếp lên đến 590°C, giữ nhiệt trong 120 phút và nguội trong không khí. Nhiệt độ tôi được chọn để đảm bảo hòa tan được cacbit và tạo sự đồng đều thành phần sau khi đúc. Sau tôi chi tiết được ram cao ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ thấm ít nhất 30°C nên tổ chức không bị biến đổi sau khi thấm. Sau khi xử lý nhiệt tôi và ram cao, các mẫu sẽ được tiến hành thấm với hai chế độ khác nhau:

Chế độ 1: thấm một giai đoạn ở 540°C trong thời gian 180 phút với độ phân hủy là 35%. Mẫu được thấm trên lò thấm công nghiệp của Công ty TNHH Nhà nước Một thành viên xích líp Đông Anh

Chế độ 2: thấm hai giai đoạn: giai đoạn 1 ở 530°C với độ phân hủy là 50-55% và giai đoạn 2 độ phân hủy là 70-75%. Mỗi giai đoạn được giữ trong thời gian 4h. Thí nghiệm được thực hiện trên thiết bị thấm của Nhà máy nhôm Đông Anh.

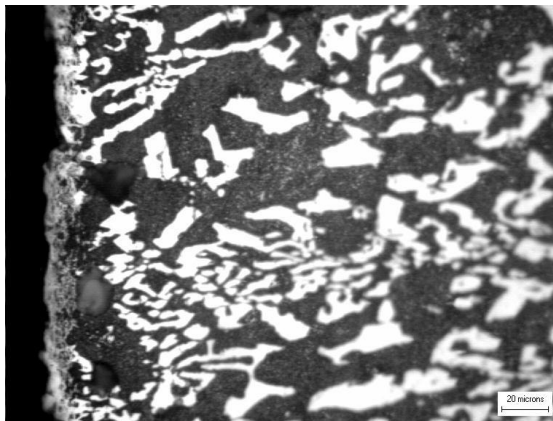
Ảnh tổ chức tế vi được chụp tại bề mặt của mẫu và trong lõi sau khi nhiệt luyện và sau mỗi chế độ thấm, sử dụng kính hiển vi quang học Axiovert 25A. Mẫu sau khi thấm được đo độ cứng tế vi trên máy Stuers Duramin. Độ cứng được đo từ bề mặt mẫu và đi sâu vào trong lõi với khoảng cách nhỏ nhất giữa các vết đo là 20 μ m, tải trọng đo là 10g. Thí nghiệm về khả năng chống mài mòn của mẫu được thực hiện trên thiết bị TE97 Friction and Wear Demonstrator tại Viện Khoa học và Kỹ thuật Vật liệu với thông số như sau: các mẫu thử mài mòn sẽ tiếp xúc với mẫu chuẩn và quay với tốc độ 100 vòng/phút, tải 8N. Sau khoảng thời gian thử 80 phút sẽ tiến hành đánh giá mức độ mài mòn của mẫu. Tốc độ ăn mòn của mẫu được xác định nhanh bằng cách đo đường cong phân cực theo phương pháp thể tích của tiêu chuẩn ASTM G102 tại Viện Nhiệt Đới - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Phương pháp này sử dụng thiết bị điện tử Potentiostat (Autolab PGSTAT30), điện cực đối

AUX (platin), điện cực so sánh SCE (điện cực calomen bão hòa) và điện cực làm việc WE (mẫu kim loại nghiên cứu) để đo đường cong phân cực thế - mật độ dòng. Ngoài ra, thiết bị phân tích EDX và thiết bị phân tích nhiễu xạ Ronghen X'pert được sử dụng để minh chứng cho sự hình thành các nitrit và xuất hiện nitor trên lớp bề mặt của gang. Hai thí nghiệm này được thực hiện tại Viện Vật lý - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

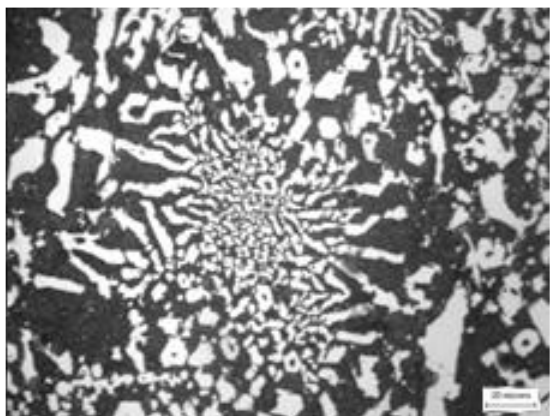
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phân tích tổ chức tế vi

Đối với chế độ thấm 1, hình ảnh tổ chức về sự phân bố lớp thấm được thể hiện rõ ràng trong Hình 1. Trên ảnh tổ chức tế vi tại bề mặt mẫu thấy xuất hiện một dải trắng liên tục có chiều dày khoảng 12 μ m (Hình 1a). Phía bên trong nền chủ yếu vẫn là tổ chức của gang với các hạt cacbit trên nền peclit (Hình 1b). Điều này được giải thích là khi thực hiện thấm nitor sẽ hình thành các pha hóa bền, tạo ra một dải liên tục ở bề mặt và phân bố gián đoạn khi đi vào sâu trong lõi.



a) Bề mặt



b) Lõi

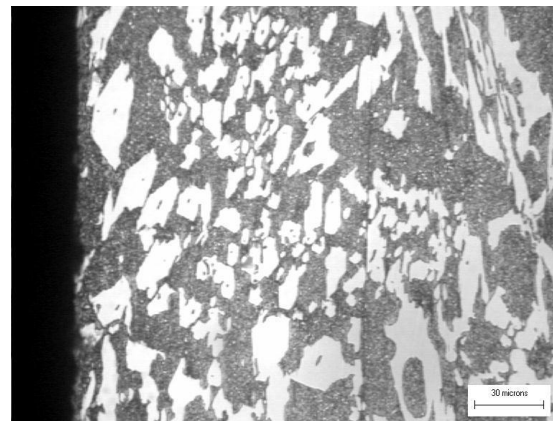
Hình 1. Ảnh tổ chức tế vi của gang 300Cr18Mn3 x500 (thấm nitor chế độ 1)

Trong chế độ 2, thực hiện thấm hai giai đoạn và có độ phân hủy cao hơn so với chế độ 1. Kết quả ảnh tổ chức cho thấy có sự khác biệt so với chế độ 1.

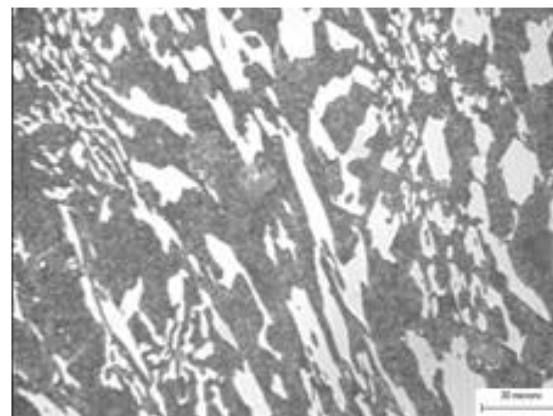
Nhận thấy, tổ chức bề mặt của mẫu thu được không xuất hiện lớp trắng như ở chế độ 1 (Hình 2). Điều này được giải thích là do các nitrit tạo thành đã bị phân tán nhỏ mịn và đi vào trong mẫu.

Theo kết quả phân tích EDX, nitor xuất hiện trên giản đồ với đỉnh Peak khá mạnh. Tuy nhiên kết quả này chỉ mang giá trị định tính và không xác định được chính xác hàm lượng nitor cũng như sự phân bố nitor từ ngoài vào bên trong lõi của mẫu.

Hình 4 là giản đồ nhiễu xạ ronggen của lớp thấm nitor trên gang 300Cr18Mn3. Kết hợp kết quả EDX và kết quả phân tích ronggen cho phép kết luận các pha hóa bền ở đây chính là các hạt nitrit với đỉnh của các pha Fe_3N , CrN được biểu hiện rõ ràng. Các pha hóa bền này sẽ đóng vai trò trong việc làm tăng mạnh độ cứng của lớp thấm.

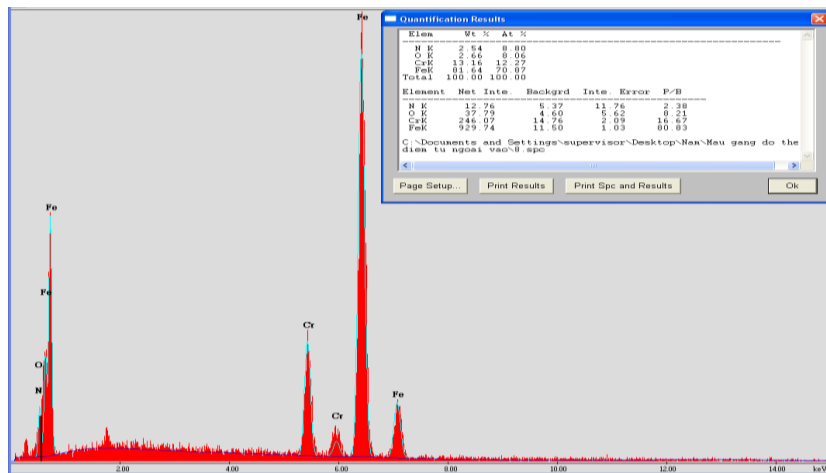


a) Bề mặt

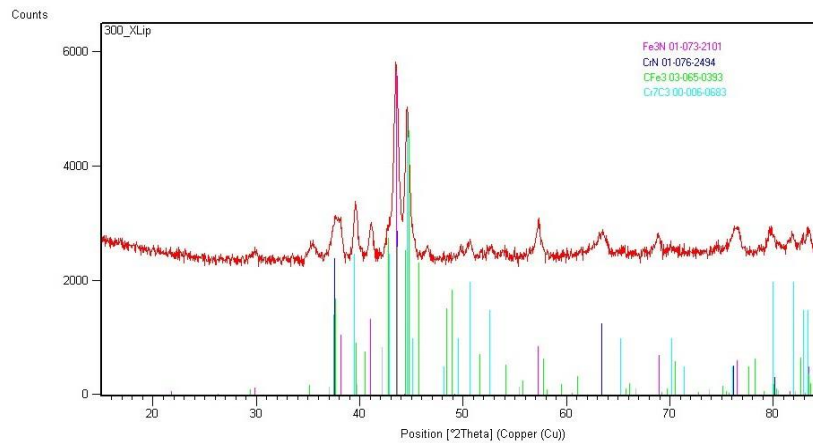


b) Lõi

Hình 2. Ảnh tổ chức tế vi của gang 300Cr18Mn3 x500 (thấm nitor chế độ 2)



Hình 3. Giải đồ phân tích nguyên tố mẫu 300Cr18Mn3



Hình 4. Giải đồ nhiễu xạ Rongen mẫu 300Cr18Mn3 sau thấm nitơ

Tuy nhiên, trên ảnh tổ chức tế vi với độ phóng đại 500 lần không quan sát thấy các pha hóa bền nêu trên, điều này chứng tỏ các pha này có kích thước rất nhỏ mịn và chính điều này góp phần làm tăng mạnh độ cứng của mẫu như phân tích dưới đây.

3.2. Phân tích cơ tính

Độ cứng

Trước khi tiến hành thấm nitơ cho hợp kim gang crôm cao, các mẫu sẽ được nhiệt luyện với mục đích đồng đều hóa thành phần sau khi đúc và đảm bảo sự ổn định tổ chức. Độ cứng của mẫu sau khi nhiệt luyện chuẩn bị cho quá trình thấm đạt được như trong Bảng 1.

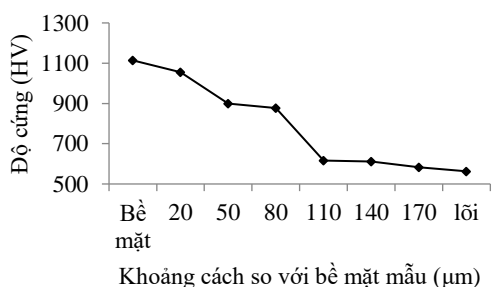
Bảng 1. Độ cứng của mẫu sau khi nhiệt luyện

Chế độ nhiệt luyện	Kết quả
Tôi + ram cao	54 HRC

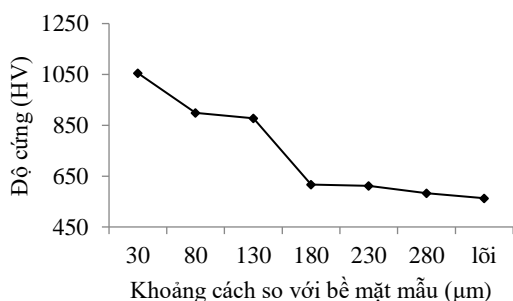
Từ đồ thị biểu diễn độ cứng của mẫu sau khi thấm ở chế độ 1 cho thấy có sự giảm độ cứng từ bề mặt lớp thấm vào trong lõi. Lớp bên ngoài có độ cứng rất cao, đạt 1114HV (trên 70HRC) so với độ cứng trước khi nhiệt luyện là 60HRC. Sự tăng mạnh độ cứng của lớp thấm là do sự hình thành các nitrit ở trên bề mặt. Từ bề mặt vào trong lõi, độ cứng có sự giảm nhưng khá đồng đều và không có hiện tượng giảm đột ngột được giải thích là do các pha hóa bền phân tán sau lớp trắng. Sự giảm dần đều đặn của độ cứng trong lớp thấm tạo nên ứng suất dư nén ở bề mặt chi tiết. Căn cứ trên kết quả độ cứng nhận thấy, chiều sâu lớp thấm vào khoảng 150µm tính từ bề mặt của chi tiết.

Đồ thị biểu diễn sự phân bố độ cứng tế vi khi thấm ở chế độ 2 được biểu diễn trên Hình 6. So với chế độ 1, độ cứng ở bề mặt của chế độ 2 có giảm nhưng nó có ưu điểm là không để lại lớp nitrit trên bề mặt. Các nitrit crôm có thể đã bị hòa tan vào bên trong và hình thành dưới dạng dung dịch rắn.

Chiều sâu lớp thấm đạt được cũng lớn hơn, vào khoảng 180 μ m, là do thời gian lưu trong lò thấm khá lớn, lên đến 8 giờ.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn sự phân bố độ cứng tế vi gang 300Cr18Mn3 (thấm nitơ chế độ 1)



Hình 6. Đồ thị biểu diễn sự phân bố độ cứng tế vi gang 300Cr18Mn3 (thấm nitơ chế độ 2)

Kết quả thử độ mài mòn:

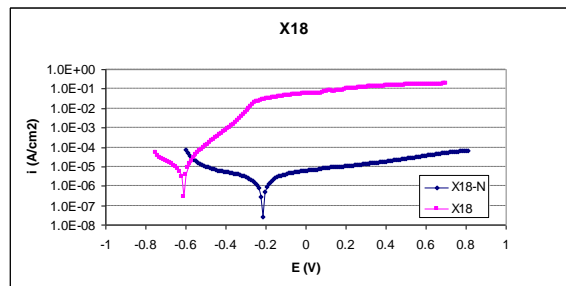
Bảng 2. Kết quả thử độ mài mòn mẫu 300Cr18Mn3

Vật liệu	Trước thấm μ m	Sau thấm μ m	
		Chế độ 1	Chế độ 2
300Cr18Mn3	5	0	0

Kết quả thử nghiệm mài mòn cho thấy độ mài mòn trước và sau khi thấm có sự thay đổi rõ rệt. Độ mài mòn sau khi thấm khi ở chế độ thử nghiệm là 0 μ m, còn mẫu trước khi thấm là 5 μ m. Điều này chứng tỏ rằng với chế độ thử nghiệm mẫu sau thấm hoàn toàn không bị mài mòn. Qua đây có thể kết luận rằng quá trình thấm nitơ giúp nâng cao khả năng chịu mài mòn bề mặt cho gang 300Cr18Mn3.

Kết quả thử độ ăn mòn

Đề thử nghiệm trong môi trường ăn mòn đối với các mẫu gang trước và sau khi thấm, tiến hành đo phân cực trong dung dịch NaCl 3.5%. Đường cong ăn mòn biểu diễn trên Hình 7.



Hình 7. Kết quả phép đo phân cực

Thực hiện ngoại suy các đoạn tuyến tính của các nhánh catốt và anốt để xác định tốc độ ăn mòn của các mẫu gang. Kết quả thu được như trong Bảng 3.

Bảng 3. Tốc độ ăn mòn của mẫu hợp kim gang

Tốc độ ăn mòn (mm/năm)	Trước thấm	Sau thấm
	0,2678	0,08356

Qua đồ thị và bảng tốc độ ăn mòn cho thấy thế ăn mòn của các mẫu gang có thấm dương hơn các mẫu chưa thấm nên trợ hơn trong dung dịch NaCl 3,5%. Mật độ dòng nhánh anốt các mẫu gang có thấm nhỏ hơn các mẫu chưa thấm nên tốc độ ăn mòn nhỏ hơn trong cùng dung dịch. Ngoài ra, tốc độ ăn mòn của các mẫu gang sau thấm nhỏ hơn 4 lần so với các mẫu chưa thấm.

4. Kết luận

Khả năng chống mài mòn trong điều kiện thử nghiệm của mẫu hợp kim gang crôm cao sau khi thấm tăng lên một cách rõ rệt so với mẫu không thấm (độ mài mòn của mẫu 300Cr18Mn3 trước thấm là 5 μ m, sau khi thấm là 0 μ m). Bên cạnh đó, các mẫu sau khi thấm có khả năng chống ăn mòn trong điều kiện thử nghiệm tăng trên 4 lần. Do vậy, mẫu hợp kim gang có khả năng tăng tuổi thọ sau khi thấm nitơ. Bằng các phương pháp phân tích đã xác định được tổ chức của lớp thấm nitơ trên gang crôm cao. Với chế độ 1 là dải nitrit liên tục trên bề mặt của mẫu; đối với chế độ 2 là các hạt nitrit nhỏ mịn phân tán trên bề mặt của mẫu nghiên cứu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT20-21.32**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Văn Bản, *Chế tạo vật liệu gang hợp kim chịu ăn mòn và mài mòn*, Viện Công nghệ.
- [2] Hoàng Thị Ngọc Quyên, *Nghiên cứu ảnh hưởng của Titan và nguyên tố đất hiếm đến tính chất mài mòn, độ dai va đập của gang trắng 13%*

- Crôm, Luận án Tiến Sĩ. Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. 2014.
- [3] Đoàn Đình Phương, *Nghiên cứu phát triển hợp kim hệ Fe-Cr-C làm việc trong điều kiện mài mòn và ăn mòn xâm thực*, Luận án Tiến sỹ kỹ thuật. Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. 2008.
- [4] Chung, R. J., Tang, X., Li, D. Y., Hinckley, B., & Dolman, K. *Effects of titanium addition on microstructure and wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron Fe-25wt.% Cr-4wt.% C*. *Wear*, Vol.267(1-4), pp. 356-361. 2009.
- [5] Zhang, Y., Shimizu, K., Yaer, X., Kusumoto, K., & Efremenko, V. G. *Erosive wear performance of heat treated multi-component cast iron containing Cr, V, Mn and Ni eroded by alumina spheres at elevated temperatures*. *Wear*, Vol.390, pp.135-145. 2017.
- [6] Guitar, M. A., Suárez, S., Prat, O., Guigou, M. D., Gari, V., Pereira, G., & Mücklich, F. *High chromium cast irons: destabilized-subcritical secondary carbide precipitation and its effect on hardness and wear properties*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.27(8), pp.3877-3885. 2018.
- [7] Nie, X., Wang, L., Yao, Z. C., Zhang, L., & Cheng, F. *Sliding wear behaviour of electrolytic plasma nitrided cast iron and steel*. *Surface and Coatings Technology*, Vol.200(5-6), pp.1745-1750. 2005.
- [8] Xie, J. P., Wang, A. Q., Wang, W. Y., & Li, L. L.. *Study on Erosion Wear Property of Nickel-Chromium Cast Iron*. In *Applied Mechanics and Materials*. Vol.117, pp.1084-1087. Trans Tech Publications Ltd. 2012.
- [9] Wei, M. X., Wang, S. Q., & Cui, X. H.. *Comparative research on wear characteristics of spheroidal graphite cast iron and carbon steel*. *Wear*, Vol.274, pp.84-93. 2012.
- [10] Yang, Z., Northwood, D. O., Sun, X., Lumbreras, R., Barber, G. C., & Zou, Q. *The use of nitriding to enhance wear resistance of cast irons*. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol.78, pp.171-182. 2013.
- [11] Riahi, A. R., & Alpas, A. T. *Wear map for grey cast iron*. *Wear*, Vol.255(1-6), pp.401-409. 2003.
- [12] Podgornik, B., Vizintin, J., Thorbjornsson, I., Johannesson, B., Thorgrimsson, J. T., Celis, M. M., & Valle, N. *Improvement of ductile iron wear resistance through local surface reinforcement*. *Wear*, Vol. 274, pp. 267-273. 2012.
- [13] Maranhão, O., Rodrigues, D., Boccalini Jr, M., & Sinatoro, A.. *Mass loss and wear mechanisms of HVOF-sprayed multi-component white cast iron coatings*. *Wear*, Vol. 274, pp. 162-167. 2012.
- [14] CALIK, A., Karakas, S., & UÇAR, N. *Wear Behaviour of Boronised and Induction Hardened Spheroidal Graphite Cast Iron*. 2012.
- [15] Gurevich, Y. G. *Wear-resistant coatings of white cast iron on powder steels*. *Powder metallurgy and metal ceramics*, Vol.50(9-10), pp. 619-624. 2012.
- [16] Nayak, B. B., Kar, O. P. N., Behera, D., & Mishra, B. K. *High temperature nitriding of grey cast iron substrates in arc plasma heated furnace*. *Surface engineering*, Vol.27(2), pp.99-107. 2011.
- [17] Nie, X., Wang, L., Yao, Z. C., Zhang, L., & Cheng, F. *Sliding wear behaviour of electrolytic plasma nitrided cast iron and steel*. *Surface and Coatings Technology*, Vol.200(5-6), pp.1745-1750. 2005.
- [18] Davis, J. *Cast irons/metallurgy and properties of ductile cast irons*. ASM Specialty Handbook, The Materials Information Society, USA. 1996.
- [19] Nicoletto, G., Tucci, A., & Esposito, L. *Sliding wear behavior of nitrided and nitrocarburized cast irons*. *Wear*, Vol.197(1-2), pp.38-44. 1996.
- [20] Tošić, M. M., & Gligorijević, R. *Plasma nitriding improvements of fatigue properties of nodular cast iron crankshafts*. *Materials Science and Engineering: A*, Vol.140, pp.469-473. 1991.
- [21] Konečná, R., Nicoletto, G., & Majerová, V.. *Structure and fatigue failure analysis of nitrided nodular cast iron*. *Metal* 2006.
- [22] Nobuki, T., Hatate, M., Kawasaki, Y., Ikuta, A., & Hamasaka, N. *Effects of Nitriding and Nitro-carburizing on the Fatigue Properties of Ductile Cast Iron*. *International Journal of Metalcasting*, Vol.11(1), pp.52-60. 2017.
- [23] Binder, C., Bendo, T., Hammes, G., Klein, A. N., & de Mello, J. D. B. *Effect of nature of nitride phases on sliding wear of plasma nitrided sintered iron*. *Wear*, Vol. 332, pp.995-1005. 2015.
- [24] Binder, C., Bendo, T., Hammes, G., Klein, A. N., & de Mello, J. D. B. *Effect of nature of nitride phases on sliding wear of plasma nitrided sintered iron*. *Wear*, Vol.332, pp.995-1005. 2015.

- [25] Gonzalez-Pociño, A., Alvarez-Antolin, F., & Asensio-Lozano, J. *Improvement of adhesive wear behavior by variable heat treatment of a tool steel for sheet metal forming*. Materials, Vol. 12(17), 2019.
- [26] Garzón, C. M., Franco Jr, A. R., & Tschiptschin, A. P. *Thermodynamic analysis of M7C3 carbide dissolution during plasma nitriding of an AISI D2 tool steel*. ISIJ International, ISIJINT-2016. 2017.
- [27] Gonzalez-Pociño, A., Alvarez-Antolin, F., & Asensio-Lozano, J. *Optimization, by Means of a Design of Experiments, of Heat Processes to Increase the Erosive Wear Resistance of White Hypoeutectic Cast Irons Alloyed with Cr and Mo*. Metals, Vol. 9(4), 2019.
- [28] Lê Thị Nhung, Vũ Thị Trang, *Ảnh hưởng của lớp thấm nitơ đến tổ chức và tính chất thép không gỉ 304*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 61 (01/2020), tr.53-57, 2020.

Ngày nhận bài: 26/12/2020

Ngày nhận bản sửa lần 01: 05/01/2021

Ngày nhận bản sửa lần 02: 12/01/2021

Ngày duyệt đăng: 22/01/2021