

## EFFECT OF TEMPERING HEAT ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF NITROGEN-CONTAINING MARTENSITE STAINLESS STEEL

Vu Dinh Toai<sup>1</sup>, Tran Thi Xuan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering - Hanoi University of Science and Technology

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering - Hanoi University of Science and Technology

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                   | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Received:</b> 20/5/2025</p> <p><b>Revised:</b> 06/11/2025</p> <p><b>Published:</b> 07/11/2025</p> <p><b>KEYWORDS</b></p> <p>Heat treatment</p> <p>Stainless steel</p> <p>Carbonitride</p> <p>Carbide</p> <p>Hardness</p> | <p>The tempering process has a great influence on the structure and mechanical properties of steel. In this study, 12CrMn1 martensite stainless steel sample with several amounts of nitrogen (0.03 and 0.05% wt.) were tempered at different temperatures. The hardness and microstructure of the steel after tempering were measured and analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The distribution of Cr, C, and N elements was analyzed by energy dispersive spectroscopy (EDS) integrated with the SEM. The results showed that the hardness of the steel after tempering increased as the tempering temperature increased from 300 °C to 400 °C reaching its highest value at 400 °C, and then decreased sharply when tempering at 600 °C. The structure of the steel after tempering was composed mainly of carbonitride and carbide phases. These phases exhibited agglomeration and coarsening when the tempering temperature increased to 600 °C. The results have verified that, the addition of nitrogen contents into 12CrMn1 martensite stainless steel affects the hardening phase and creates a second hardness when tempering the steel.</p> |

## ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT RAM ĐẾN TỔ CHỨC TẾ VI VÀ ĐỘ CỨNG CỦA THÉP KHÔNG GỈ MÁC-TEN-XÍT CÓ CHỨA NITƠ

Vũ Đình Toại<sup>1</sup>, Trần Thị Xuân<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Cơ khí - Đại học Bách khoa Hà Nội, <sup>2</sup>Trường Vật liệu - Đại học Bách khoa Hà Nội

| THÔNG TIN BÀI BÁO                                                                                                                                                                                                                    | TÓM TẮT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ngày nhận bài:</b> 20/5/2025</p> <p><b>Ngày hoàn thiện:</b> 06/11/2025</p> <p><b>Ngày đăng:</b> 07/11/2025</p> <p><b>TỪ KHÓA</b></p> <p>Nhiệt luyện</p> <p>Thép không gỉ</p> <p>Cacbon nitrit</p> <p>Cacbit</p> <p>Độ cứng</p> | <p>Quá trình ram thép có ảnh hưởng lớn đến tổ chức và cơ tính của thép. Trong nghiên cứu này, mẫu thép không gỉ mác-ten-xít 12CrMn1 có bổ sung lượng nitơ nhất định (0,03 và 0,05% khối lượng) được ram ở các nhiệt độ khác nhau. Mẫu sau ram được đo độ cứng và phân tích tổ chức tế vi bằng hiển vi quang học và hiển vi điện tử quét (SEM). Sự phân bố của các nguyên tố Cr, C và N được phân tích bằng phổ tán sắc năng lượng (EDS) tích hợp trên kính hiển vi điện tử quét. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ cứng của thép sau ram tăng khi nhiệt độ ram tăng từ 300 °C đến 400 °C và đạt được cao nhất khi ram ở nhiệt độ 400 °C sau đó giảm mạnh khi tăng nhiệt độ ram đến 600 °C. Tổ chức của thép sau tôi quan sát có sự tiết pha cacbit và cacbon nitrit. Các pha cacbit và cacbon nitrit có hiện tượng tích tụ và thô hóa khi nhiệt độ ram tăng lên 600 °C. Kết quả cho thấy, việc bổ sung hàm lượng nitơ vào trong thép không gỉ mác-ten-xít 12CrMn1 ảnh hưởng đến tiết pha hóa bền và tạo độ cứng thứ 2 khi ram thép.</p> |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12844>

\* Corresponding author. Email: xuan.tranthi@hust.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Thép không gỉ mác-ten-xít có cấu trúc tế vi dạng tấm với sự kết hợp đặc biệt giữa độ bền cao, độ dẻo tốt và chi phí thấp cho nhiều ứng dụng kết cấu. Những đặc tính này thường đạt được thông qua quá trình xử lý nhiệt tôi và ram. Quá trình tôi bao gồm nung nóng thép đến nhiệt độ austenit hóa và làm nguội nhanh thép về nhiệt độ phòng để hình thành tổ chức mác-ten-xít. Tổ chức mác-ten-xít có sai lệch mạng tương đương với ferit ở trạng thái cân nguội, giòn và do đó không phù hợp để làm việc [1]. Để khắc phục vấn đề này, thép sau tôi được ram trong khoảng nhiệt độ dưới  $A_{c1}$  làm thay đổi cấu trúc tế vi vật liệu sau tôi và giảm ứng suất dư bên trong chi tiết. Do đó, làm tôi ưu hóa các đặc tính cơ học: tăng đáng kể độ dai và độ dẻo và làm giảm giới hạn chảy, độ cứng và độ bền kéo đạt cực đại [2].

Hiện nay, việc thêm nitơ vào thành phần của thép không gỉ mác-ten-xít để cải thiện cơ tính và khả năng chống ăn mòn. Khi thêm nitơ vào thép không gỉ 1Cr12NiMo với hàm lượng 0,0027 lên 0,022% thì độ bền và độ dai của thép tăng, kích thước tấm mác-ten-xít giảm, mật độ lệch trong tấm mác-ten-xít tăng [3]. Mặt khác, việc bổ sung hàm lượng nitơ vào trong thép cũng làm cản trở sự phát triển hạt austenit khi tôi [3]. Theo tài liệu [4], việc thay thế một phần hàm lượng carbon bằng nitơ vào thép không gỉ mác-ten-xít 9Cr18Mo cũng làm thay đổi đáng kể tổ chức và độ cứng của thép. Khi hàm lượng nitơ tăng đến 0,15% thì độ cứng của thép đạt được là 60,5 HRC, độ bền đạt được là 1900MPa, hình thái mác-ten-xít chuyển từ dạng tấm sang dạng khối và có sự xuất hiện pha Cr<sub>2</sub>N trên nền mác-ten-xít [4] – [6]. Nitơ là nguyên tố làm ổn định mạnh austenit nên thường được sử dụng để thay thế một phần Ni để ngăn chặn hiệu quả sự xuất hiện của pha  $\delta$ -ferrite trong thép không gỉ mác-ten-xít [6], [7]. Bổ sung nitơ với hàm lượng nhất định cho thép không gỉ mác-ten-xít có hàm lượng carbon cao làm hạn chế ăn mòn lỗ cho thép [8]. Ngoài ra, sự có mặt của N trong thép làm tăng lượng austenit sau tôi [9], [10]. Theo tài liệu [10], độ cứng và sự phân hủy của mác-ten-xít và tiết pha cacbon nitrit trong quá trình ram thép 0,78% C, 5,6% Cr, 2,1% W, 3,4% Mo và 2,2% V, có bổ sung 770 ppm và không chứa N khi ram thép trong khoảng nhiệt độ từ 425–525 °C được nghiên cứu. Kết quả cho thấy cả hai loại thép đều xuất hiện độ cứng thứ 2 khi ram, nhưng đối với thép có bổ sung nitơ thì độ cứng thứ 2 đạt được cao hơn và phạm vi nhiệt độ ram xảy ra độ cứng thứ 2 rộng hơn. Đối với thép chứa N hiện tượng độ cứng thứ 2 bắt đầu từ 425 °C đến giá trị cực đại ở 525 °C [10]. Trong quá trình ram, nitride tiết ra ở 425 °C, pha cacbon nitrit phức hợp có thể hình thành khi ram ở 550 °C. Lượng austenit sau tôi chuyển biến chủ yếu khi ram ở 525 °C. Mặt khác, khi bổ sung N với lượng 0,1% vào thép không gỉ mác-ten-xít 16Cr5NiMo cho thấy trong quá trình ram độ bền của thép tăng nhưng độ dẻo và độ dai của thép giảm, nguyên nhân là do có sự tiết pha Cr<sub>2</sub>N trong tổ chức của thép [6]. Đồng thời, quá trình ram thép không gỉ mác-ten-xít X4CrNiMo16-5-1 chứa 0,034 wt% C và 0,032 wt% N ở nhiệt độ từ 400 đến 700 K có sự khuếch tán của C và N, thể tích của ô cơ sở mác-ten-xít giảm [11]. Sự thay đổi thông số mạng của mác-ten-xít là do sự giảm ứng suất cơ học và của sự tiết pha cacbit, cacbitnitrit làm giảm C và N trong mác-ten-xít [11]. Trong quá trình ram thép không gỉ ferrite/mác-ten-xít chứa nitơ cũng quan sát thấy sự tiết pha nitride CrN, cacbon nitrit giàu crom M<sub>2</sub>(C,N), cacbit giàu crom M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> và các pha này tích tụ dẫn đến bị thô hóa khi ram ở nhiệt độ cao khoảng trên 600°C [12], [13]. Tóm lại, thép không gỉ mác-ten-xít được bổ sung với hàm lượng N nhất định làm lượng austenit dư sau tôi tăng. Trong quá trình ram thép, austenit dư sẽ bị phân hủy thành mác-ten-xít (thường phân hủy ở nhiệt độ cao hơn thép không chứa N) dẫn đến hiện tượng độ cứng tăng (độ cứng thứ 2). Ngoài ra, hiện tượng tăng độ cứng xảy ra khi ram thép chứa N cũng là do sự tiết pha cacbon nitrit và cacbit. Khi ram thép ở nhiệt cao cũng dẫn đến sự tích tụ và thô hóa các pha cacbon nitrit và cacbit làm độ cứng giảm. Trong nghiên cứu này, thép không gỉ mác-ten-xít có bổ sung nitơ với hàm lượng 0,03 và 0,05 (%wt) được tôi và sau đó ram ở các nhiệt độ khác nhau. Mẫu sau ram được mang đi phân tích tổ chức và xác định độ cứng để đánh giá và chọn ra chế độ ram hợp lý cho thép.

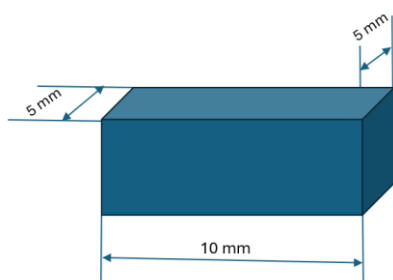
## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Thành phần hóa học và quy trình xử lý nhiệt cho thép

Mẫu thép nghiên cứu được xác định thành phần bằng phương pháp quang phổ phát xạ, kết quả nhận được như thể hiện ở Bảng 1.

| Thép       | Thành phần hóa học (% khối lượng) |     |      |       |      |       |       |      |
|------------|-----------------------------------|-----|------|-------|------|-------|-------|------|
|            | C                                 | Si  | Mn   | Cr    | Ni   | P     | S     | N    |
| <b>MN5</b> | 0,04                              | 0,4 | 1,17 | 11,68 | 0,08 | 0,024 | 0,005 | 0,05 |
| <b>MN3</b> | 0,05                              | 0,4 | 1,41 | 12,13 | 0,07 | 0,022 | 0,008 | 0,03 |

Sau khi phân tích thành phần, 9 mẫu thép được cắt dây theo hình dạng và kích thước (5 x 10 x 5 mm<sup>3</sup>) như Hình 1.



**Hình 1.** Hình dạng và kích thước mẫu

#### *Quy trình xử lý nhiệt cho thép*

Thép không gỉ mác-ten-xít thường được tôi bằng cách nung nóng đến trạng thái hoàn toàn là austenit từ 925 °C đến 1065 °C và sau đó làm nguội trong không khí hoặc dầu [14]. Trong nghiên cứu thép MN5 và MN3 với hàm lượng nitơ tương ứng là 0,05 và 0,03 (%wt) trước khi ram sẽ được tôi ở nhiệt độ 1010°C bằng lò nhiệt luyện Nabertherm GmbH, làm nguội trong dầu. Mẫu sau tôi được ram ở các nhiệt độ 300 °C, 400 °C, 500 °C và 600 °C trong thời gian 45 phút bằng lò nhiệt luyện Nabertherm N11/H và làm nguội trong không khí.

### 2.2. Phân tích mẫu thép sau ram

Các mẫu thép sau khi được xử lý nhiệt theo quy trình ở mục 2.1 được phân tích tuần tự theo các bước như sau:

Bước 1: Mẫu sau ram được mang đi cắt dây. Sau đó đo độ cứng HRC tại 3 vị trí khác nhau của mặt cắt mẫu trên thiết bị đo độ cứng Rockwell - Laryee XHR-150.

Bước 2: Chuẩn bị mẫu tế vi theo các bước: mài phẳng trên giấy ráp lần lượt qua các loại giấy (100, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500), sau đó mang đi đánh bóng và tẩm thực bằng dung dịch 10g CuCl<sub>2</sub> + 20 ml HCl + 250 ml cồn 90 độ.

Bước 3: Chụp ảnh tổ chức trên kính hiển vi quang học Axiovert 25CA và hiển vi điện tử quét JSM-6510LV (lưu ý các phân tích đều được thực hiện trên mặt cắt của các mẫu để đảm bảo tính chính xác và đồng bộ của nghiên cứu).

Bước 4: Phân tích phổ tán sắc năng lượng (EDS) để xác định thành phần nguyên tố C, N và Cr tại các vị trí khác nhau trong tổ chức để đánh giá sự tiết các pha cacbit (MC) và cacbon nitrit M (C, N) (trong đó M là nguyên tố kim loại cụ thể trong thép nghiên cứu là nguyên tố Cr) được tích hợp trên hiển vi điện tử quét JSM-6510LV.

Bước 5: Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến độ cứng và tổ chức của thép nghiên cứu.

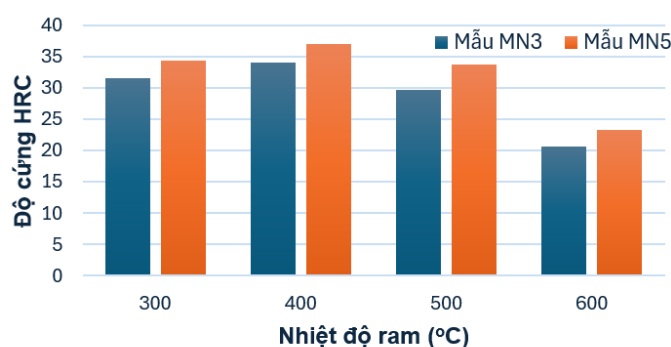
### 3. Kết quả và bàn luận

#### 3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến độ cứng của thép

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến tổ chức và cơ tính của hai mẫu thép, nhóm nghiên cứu đã thử nghiệm ram hai mẫu thép MN3, MN5 ở các nhiệt độ ram 300 °C, 400 °C, 500 °C và 600 °C. Kết quả được thể hiện như Bảng 2 và Hình 2.

**Bảng 2.** Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến độ cứng HRC của thép

| Mẫu         | Ram 300 |      | Ram 400 |      | Ram 500 |      | Ram 600 |      |
|-------------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
|             | MN3     | MN5  | MN3     | MN5  | MN3     | MN5  | MN3     | MN5  |
| Vị trí đo 1 | 30,7    | 33,8 | 34,6    | 37,4 | 30,2    | 33,4 | 20      | 23   |
| Vị trí đo 2 | 32,7    | 34,5 | 33,4    | 36,3 | 29,3    | 33,8 | 20      | 23   |
| Vị trí đo 3 | 31      | 34,7 | 34      | 37,4 | 29,5    | 34   | 21,8    | 23,8 |
| Trung bình  | 31,5    | 34,3 | 34      | 37   | 29,7    | 33,7 | 20,6    | 23,3 |



**Hình 2.** Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến độ cứng của thép

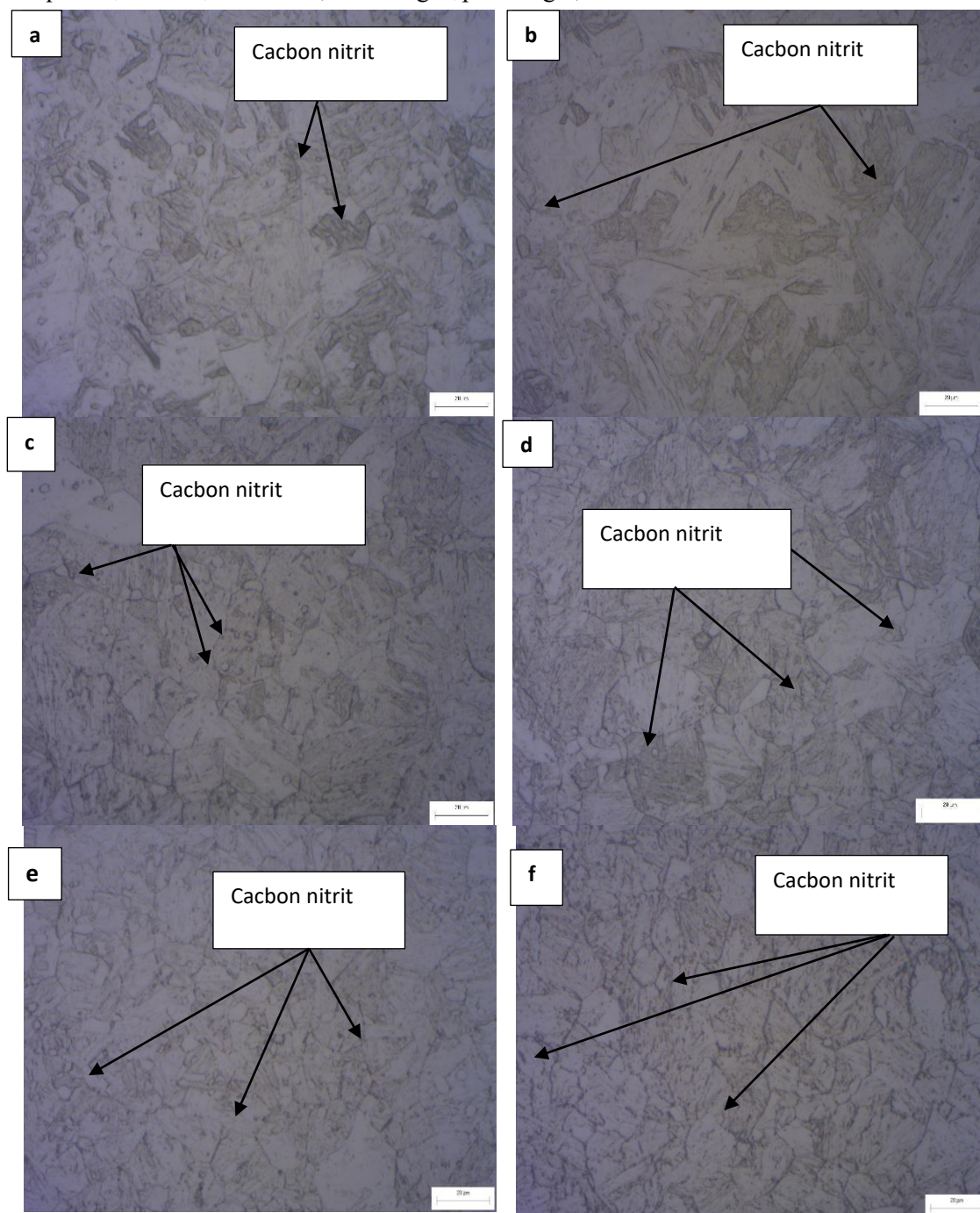
Từ kết quả nhận được ta thấy, độ cứng của thép MN5 sau ram ở tất cả các nhiệt độ đều có giá trị lớn hơn so với thép MN3, nguyên nhân là do hàm lượng N trong thép cao hơn. Thép MN3 và MN5 sau khi được ram ở các nhiệt độ khác nhau độ cứng nhận được có xu hướng tăng khi tăng nhiệt độ ram từ 300 °C đến 400 °C và đạt cao nhất ở nhiệt độ ram 400 °C. Tiếp tục tăng nhiệt độ ram từ 400 °C đến 600 °C, độ cứng trên cả 2 loại thép đều giảm dần. Trong khoảng nhiệt độ từ 400 ÷ 500 °C độ cứng của 2 thép có xu hướng giảm chậm hơn so với khi ram thép trong khoảng nhiệt độ từ 500 °C đến 600 °C. Mặt khác, sự giảm độ cứng khi tăng nhiệt độ ram đối với thép MN5 chậm hơn so với mẫu MN3. Cụ thể, khi nhiệt độ ram tăng từ 400 °C đến 500 °C độ cứng thép MN5 và MN3 giảm tương ứng là 3,3 HRC và 4,3 HRC. Như vậy, sau khi ram thép MN5 và MN3 đều có hiệu ứng tăng độ cứng ở khoảng nhiệt độ 400 °C. Nguyên nhân là do lượng austenit dư sau tôi đã chuyển biến hoàn toàn thành mác-ten-xít, đồng thời tại nhiệt độ này có sự tiết ra các pha cacbit và cacbon nitrit với kích thước nhỏ mịn. Khi ram ở nhiệt độ cao hơn, từ 500 ÷ 600 °C, các pha cacbit và cacbon nitrit bị thô hóa làm cho độ cứng có xu hướng giảm mạnh [10], [12] – [14].

#### 3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến tổ chức của thép

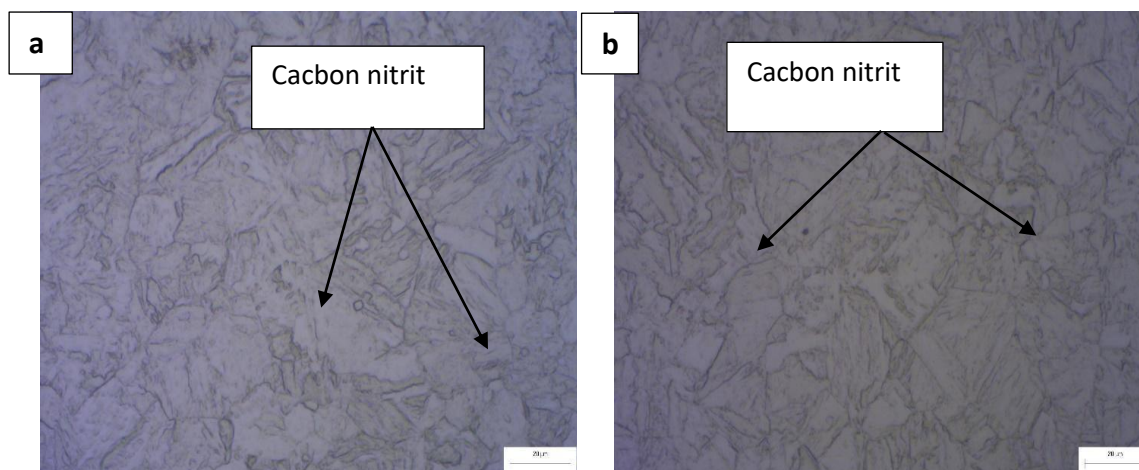
Hình 3, 4 là tổ chức tế vi của thép MN5 và MN3 được chụp trên kính hiển vi quang học. Quan sát tổ chức tế vi của mẫu ram ở các nhiệt độ 300 °C ta thấy rất ít pha cacbit và cacbon nitrit tiết ra ở vị trí biên và trong hạt trên nền mác-ten-xít. Hàm lượng các pha cacbit và cacbon nitrit có xu hướng tăng khi tăng nhiệt độ ram. Tại nhiệt độ 400 °C pha cacbit và cacbon nitrit tiết ra nhiều và nhỏ mịn trên cả 2 mẫu thép MN5 và MN3. Đây là nguyên nhân làm độ cứng của thép đạt được cao nhất khi ram ở nhiệt độ 400 °C.

Mặt khác khi ram thép tại nhiệt độ 400 °C, số lượng pha cacbit và cacbon nitrit trên mẫu MN5 nhiều hơn so với mẫu MN3. Các pha cacbit và cacbon nitrit phân bố chủ yếu ở biên hạt austenit ban đầu và một số ở giữa các tấm mác-ten-xít. Khi tăng nhiệt độ lên 600 °C thì pha cacbit và

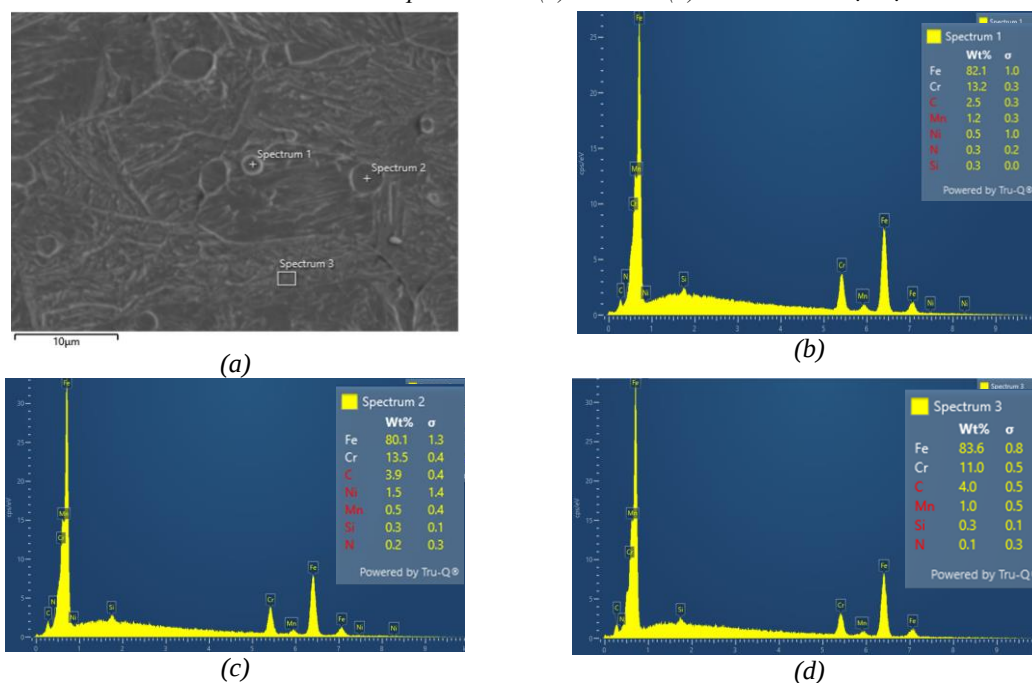
cacbon nitrit có xu hướng tích tụ và thô hóa. Để xác định được các pha cacbit và cacbon nitrit tiết ra trong quá trình ram, mẫu MN5 và MN3 ram ở nhiệt độ 400 °C được tiếp tục phân tích EDS. Kết quả được thể hiện ở Hình 5, 6 và tổng hợp ở Bảng 3, 4.



**Hình 3.** Ảnh hưởng của nhiệt độ ram đến tổ chức của thép: MN5 ram 300 °C (a), MN3 ram 300 °C (b), MN5 ram 400 °C (c), MN3 ram 400 °C (d), MN5 ram 500 °C (e), MN3 ram 500 °C (f)



Hình 4. Tổ chức tế vi của thép MN5 ram (a) và MN3 (b) sau ram ở nhiệt độ 600°C



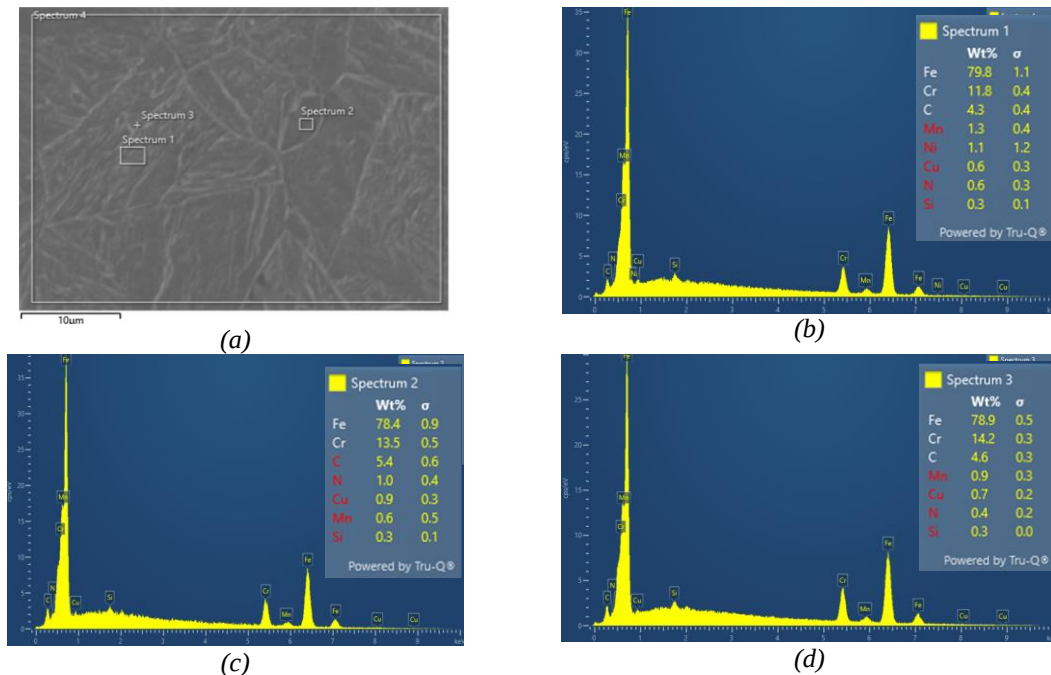
Hình 5. Các vị trí phân tích EDS trên mẫu MN3 (a) và kết quả phân tích EDS tại spectrum 1 (b), spectrum 2 (c), spectrum 3 (d)

Bảng 3. Tổng hợp kết quả phân tích EDS mẫu MN3 khi ram ở nhiệt độ 400 °C

| % khối lượng của các nguyên tố hóa học (% wt.) | Cr   | N   | C   | Fe   | Si  | Mn  |
|------------------------------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Spectrum 1                                     | 13,2 | 0,3 | 2,5 | 82,1 | 0,3 | 1,2 |
| Spectrum 2                                     | 13,5 | 0,2 | 3,9 | 80,1 | 0,3 | 0,5 |
| Spectrum 3                                     | 11   | 0,1 | 4   | 83,6 | 0,3 | 1   |

Bảng 4. Tổng hợp kết quả phân tích EDS mẫu MN5 khi ram ở nhiệt độ 400 °C

| % khối lượng của các nguyên tố hóa học (%wt) | Cr   | N   | C   | Fe   | Si  | Mn  |
|----------------------------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Spectrum 1                                   | 11,8 | 0,6 | 4,3 | 79,8 | 0,3 | 1,3 |
| Spectrum 2                                   | 13,5 | 1   | 5,4 | 78,4 | 0,3 | 0,6 |
| Spectrum 3                                   | 14,2 | 0,4 | 4,6 | 78,9 | 0,3 | 0,9 |



**Hình 6.** Các vị trí phân tích EDS trên mẫu MN5 (a) và kết quả phân tích EDS tại spectrum 1 (b), spectrum 2 (c), spectrum 3 (d)

Từ kết quả EDS nhận được ta thấy, trên cả 2 mẫu thép MN5 và MN3 hàm lượng nguyên tố Cr tại các điểm phân tích dao động từ  $11 \div 14$  %wt. Trên mẫu thép MN3, hàm lượng N tại các vị trí 1, 2 (các vị trí pha tiết ra ở biên hạt austenit ban đầu) hàm lượng N đo được cao hơn vị trí nền mác-ten-xít – điều này cũng phù hợp khi phân tích EDS tại vị trí 2 trên mẫu MN5 (%N xấp xỉ 1% wt). Mặt khác tại các vị trí này hàm lượng carbon cũng được xác định dao động từ  $2,5 \div 5$  %wt. Như vậy có thể phán đoán, tại các vị trí pha tiết ra ở biên hạt có thể là cacbon nitrit.

#### 4. Kết luận

Khi nhiệt độ ram thép tăng từ 300 đến 400 °C, độ cứng của thép MN5 và MN3 tăng và đạt độ cứng cao nhất ở nhiệt độ khoảng 400 °C. Khi nhiệt độ ram tăng lên 600 °C, độ cứng của 2 mẫu thép MN5 và MN3 đều giảm. Mặt khác, thép không gỉ mác-ten-xít có hàm lượng nitơ ít hơn (MN3) thì sự giảm độ cứng xảy ra mạnh hơn so với mẫu thép không gỉ mác-ten-xít có nitơ nhiều hơn (MN5). Thép MN5 có độ cứng đạt được luôn cao hơn mẫu thép MN3 khi ram ở cùng nhiệt độ 300, 400, 500 và 600 °C.

Tổ chức vi của mẫu sau ram quan sát thấy có sự tiết pha cacbit và cacbon nitrit ở biên hạt austenit ban đầu và trong hạt. Tại nhiệt độ ram 400 °C, các pha tiết ra ở trạng thái phân tán nhỏ mịn. Khi ram ở nhiệt độ cao hơn có hiện tượng tích tụ và thô hóa pha cacbit và cacbon nitrit.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Natori, Y. Futamura, T. Tsuchiyama, *et al.*, “Difference in recrystallization behavior between lathmác-ten-xít and deformed ferrite in ultralow carbon steel,” *Scr. Mater.*, vol. 53, pp. 603–608, 2005.
- [2] G. R. Speich, “Tempering of low-carbon martensite” *Trans. Metall. Soc. AIME*, vol. 245, pp. 2553 – 2564, 1969.
- [3] R. Fan, M. Gao, Y. Ma, *et al.*, “Effects of Heat Treatment and Nitrogen on Microstructure and Mechanical Properties of 1Cr12NiMo Mács-ten-xít Stainless Steel,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 11, pp. 1059–1066, 2012.
- [4] R. Wang, F. Li, Z. Yu, *et al.*, “Inflences of partial substitution of C by N on the microstructure and mechanical properties of 9Cr18Mo mács-ten-xít stainless steel,” *Materials & Design*, vol. 236, 2023, Art. no. 112497.

- 
- [5] W.-C. Jiao, H.-B. Li, J. Dai, *et al.*, “Effect of partial replacement of carbon by nitrogen on intergranular corrosion behavior of high nitrogen mác-ten-xít stainless steels,” *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 35, pp. 2357-2364, 2019.
- [6] X. P. Ma, L.J. Wang, B. Qin, *et al.*, “Effect of N on microstructure and mechanical properties of 16Cr5Ni1Mo mác-ten-xít stainless steel,” *Materials and Design*, vol. 34, pp. 74–81, 2012.
- [7] E. A. Lass, F. Zhan, and C. E. Campbell, “Nitrogen Effects in Additively Manufactured Martensite Stainless Steels: Conventional Thermal Processing and Comparison with Wrought,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 51, pp. 1-15, 2020.
- [8] P. K. Farayibi *et al.*, “Influence of nitrogen uptake and heat treatment on the microstructural characteristics and corrosion performance of X190CrVMo20 - 4 - 1 steel produced by supersolidus liquid - phase sintering,” *Materials and Corrosion*, vol. 32, pp. 1 –18, 2021.
- [9] R. Hara, M. Yamamoto, G. Ito, *et al.*, “Effect of Nitrogen on the Microstructure and Hardness of High-Carbon High-Speed Tool Steel Type Alloys,” *Materials Transactions*, vol. 57, no. 11, pp. 1945- 1951, 2016.
- [10] M. Wang, Y. Wang, and F. Sun, “Tempering behavior of a semi-high speed steel containing nitrogen,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 438–440, pp. 1139–1142, 2006.
- [11] F. Niessen, M. Villa, F. Danoix, *et al.*, “In-situ analysis of redistribution of carbon and nitrogen during tempering of low interstitial mác-ten-xít stainless steel,” *Scripta Materialia*, vol. 154, pp. 216 –219, 2018.
- [12] Teixeira, M. Salazar, and J. Macchi, “Effects of carbon and nitrogen concentrations on precipitation sequence during tempering of mác-ten-xít steels investigated by advanced experimental methods and modeling,” *Proceedings of the 29th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering World Congress*, Cleveland, Ohio, USA, September 30–October 3, 2024, pp. 327-331.
- [13] Y. Z. Shen, S. H. Kim, H. D. Cho, *et al.*, “Influence of tempering temperature upon precipitate phases in a 11%Cr ferritic/mác-ten-xít steel,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 400, pp. 94–102, 2010.
- [14] J. Dossett and G. E. Totten, “Heat Treating,” in *ASM Metals Handbook*, vol. 04, ASM International, 2013, pp. 1712-1732.