

EFFECT OF SECOND PHASES ON CORROSION RESISTANCE OF AISI 2205 DUPLEX STAINLESS STEEL

Nguyen Thi Van Thanh

School of Materials Science and Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	21/4/2025	The formation of the second phases in duplex stainless steels reduces the mechanical properties and the corrosion resistance of this steel group. In this study, the influence of the second phases on the corrosion resistance of the common duplex stainless steel AISI 2205 was experimentally investigated. The steel was quenched at 1100 °C, tempered at 750 °C and different holding time. The formation of the second phase in the microstructure was recorded. Then, the electrochemical corrosion parameters of the steel after heat treatment were measured. The results showed that the second phases formed about 1.5% with the holding time of 15 minutes at 750 °C and caused a reduction in the pitting corrosion potential of the ferrite phase by 44%. This shows that, with just a small amount of the second phases appearing in the microstructure, the corrosion resistance of duplex steel is significantly reduced. This is a recommendation in the use of duplex stainless steel. The attention should be paid to heat treatment processes and high temperature applications.
Revised:	26/6/2025	
Published:	26/6/2025	
KEYWORDS		
Duplex stainless steel		
AISI 2205		
Pitting corrosion		
Secondary phase		
Heat treatment		

ẢNH HƯỞNG CỦA PHA THỨ HAI ĐẾN TÍNH BỀN ẪN MÒN CỦA THÉP KHÔNG GỈ DUPLEX AISI 2205

Nguyễn Thị Vân Thanh

Trường Vật liệu - Đại học Bách Khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	21/4/2025	Sự hình thành pha thứ hai trong thép không gỉ duplex làm giảm cơ tính và tính bền ăn mòn của dòng thép này. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của pha thứ hai đến tính bền ăn mòn của loại thép không gỉ duplex thông dụng AISI 2205 được khảo sát bằng thực nghiệm. Thép được tôi ở 1100 °C và ram ở 750 °C giữ nhiệt ở các thời gian khác nhau và ghi lại sự hình thành pha thứ hai trong tổ chức tế vi. Đồng thời đo các thông số ăn mòn điện hóa của thép sau xử lý nhiệt. Kết quả cho thấy, pha thứ hai hình thành khoảng 1,5% với thời gian giữ nhiệt 15 phút tại 750 °C và làm giảm điện thế ăn mòn lỗ của pha ferrite đến 44%. Điều này cho thấy, chỉ cần xuất hiện một lượng nhỏ pha thứ hai trong tổ chức tế vi, tính bền ăn mòn của thép duplex suy giảm một cách đáng kể. Đây là một khuyến cáo trong việc sử dụng thép không gỉ duplex. Các quá trình xử lý nhiệt và các ứng dụng ở nhiệt độ cao cần được điều khiển cẩn trọng.
Ngày hoàn thiện:	26/6/2025	
Ngày đăng:	26/6/2025	
TỪ KHÓA		
Thép không gỉ duplex		
AISI 2205		
Ăn mòn lỗ		
Pha thứ hai		
Xử lý nhiệt		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12640>

Email: thanh.nguyenthivan@hust.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

280

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Thép không gỉ duplex là dòng thép không gỉ thế hệ mới trong họ thép không gỉ [1], [2]. Nhờ có cơ tính cao, khả năng chống ăn mòn vượt trội, thép không gỉ duplex trở thành một loại vật liệu được lựa chọn đầu tiên trong các ứng dụng cần độ bền cao trong môi trường có tính ăn mòn. Với việc bổ sung thêm Cr, Mo và N trong thành phần làm thép không gỉ duplex có tính bền ăn mòn lỗ, bền ăn mòn tinh giới và bền ăn mòn ứng suất rất tốt, thậm chí tốt hơn so với dòng thép không gỉ austenite [3], [4]. Tổ chức làm việc của thép gồm hai pha austenite và ferrite với tỷ lệ khoảng 50% cho mỗi pha nhằm kết hợp tốt nhất giữa độ bền và tính dẻo của dòng thép này [5], [6].

Tuy nhiên, trong quá trình xử lý nhiệt và sử dụng, khi thép bị nung nóng trong vùng nhiệt độ 350 – 1050 °C, pha thứ hai hình thành trong tổ chức tế vi của thép duplex, chúng làm giảm cơ tính và tính bền ăn mòn của thép [7], [8]. Các pha thứ hai trong thép không gỉ duplex bao gồm các pha liên kim Fe-Cr-Mo, các pha carbides và pha nitrides. Việc hình thành các pha thứ hai này, đặc biệt pha liên kim (pha sigma chứa hàm lượng Cr lên đến 30%) làm cho nền thép bị nghèo các nguyên tố Cr, Mo dẫn đến giảm độ dai và khả năng chống ăn mòn của thép [9], [10]. Nhiều nhóm nghiên cứu về sự hình thành và biến đổi tổ chức trong các loại thép không gỉ duplex trong quá trình xử lý nhiệt và trong quá trình sử dụng thép [11] – [13], nhưng vẫn cần thêm thông tin để làm sáng tỏ thời điểm, vị trí và cách hình thành các pha thứ hai trong thép, đồng thời xác định cụ thể sự ảnh hưởng của chúng đến đặc tính ăn mòn của thép.

Trong nghiên cứu này, một loại thép phổ biến thuộc dòng thép không gỉ duplex được chọn để thực hiện thí nghiệm là AISI 2205. Sự hình thành pha thứ hai trong thép được khảo sát bằng chế độ xử lý nhiệt. Quá trình bao gồm tôi thép để đạt được trạng thái hoàn toàn song pha austenite và ferrite sau đó thép được ram ở nhiệt độ 750 °C trong các khoảng thời gian khác nhau nhằm theo dõi sự hình thành pha thứ hai trong tổ chức tế vi của thép. Các mẫu thép này sau đó được kiểm tra đặc tính ăn mòn thông qua phương pháp xác định đường cong phân cực để xác định các thông số ăn mòn điện hóa trong môi trường chứa ion halogen. Qua đó, việc đánh giá sự hình thành và ảnh hưởng của pha thứ hai đến đặc tính ăn mòn của thép được thực hiện.

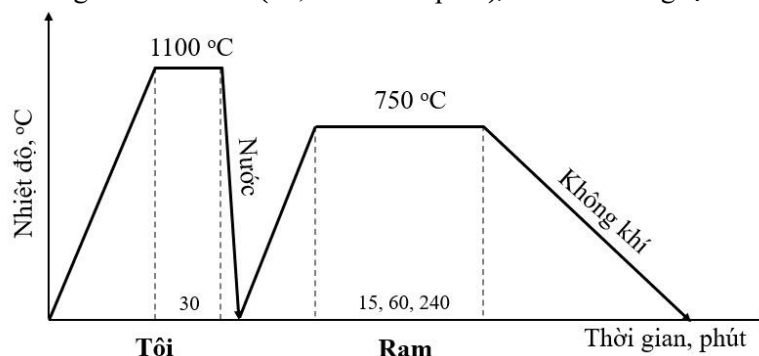
2. Phương pháp nghiên cứu

Thép không gỉ duplex được sử dụng trong nghiên cứu có thành phần như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép duplex 2205 nghiên cứu

Nguyên tố	C	Cr	Mo	Ni	N	Si	Mn	P	S	Fe
% Khối lượng	0,018	21,54	3,0	5,4	0,22	0,6	1,5	< 0,03	< 0,15	còn lại

Để khảo sát sự tiết pha liên kim trong tổ chức tế vi và ảnh hưởng của chúng đến tính bền ăn mòn của thép, quy trình xử lý nhiệt thép được đưa ra trong Hình 1. Thép được nung ở 1100 °C trong 30 phút sau đó làm nguội nhanh trong nước. Tiếp đến, thép được ram ở nhiệt độ 750 °C và giữ nhiệt trong các thời gian khác nhau (15, 60 và 240 phút), sau đó làm nguội trong không khí.



Hình 1. Quy trình xử lý nhiệt mẫu thép

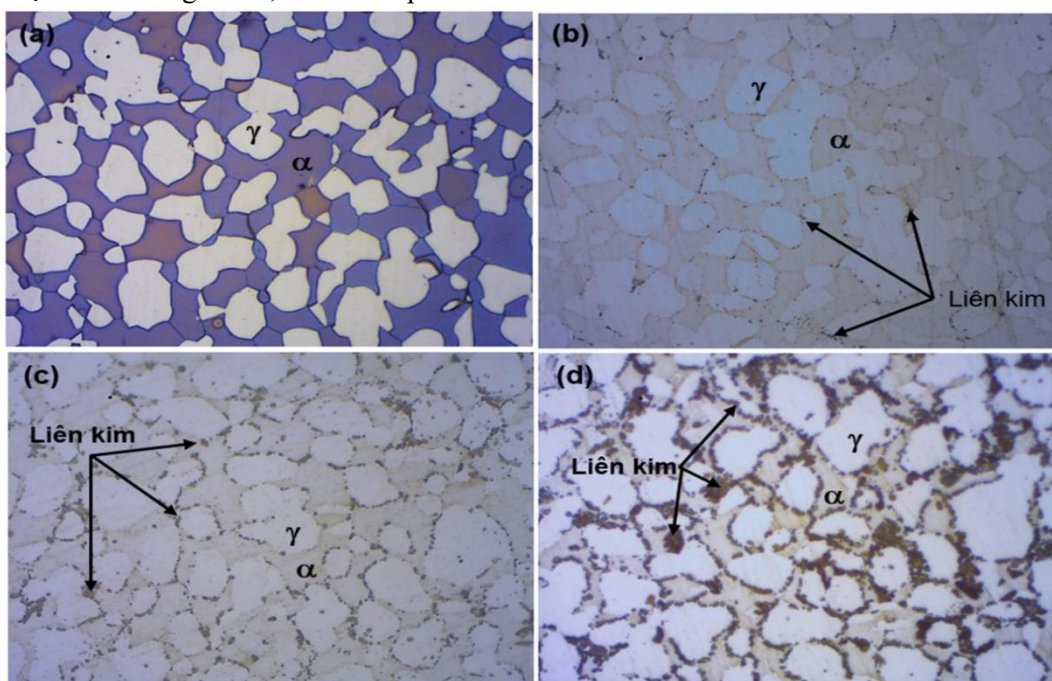
Tổ chức tế vi của thép được quan sát và chụp ảnh trên kính hiển vi quang học Axiovert 100A, kính hiển vi điện tử quét (JEOL JSM-IT200) và thiết bị phân tích nhiễu xạ tia X (PANalytical AERIS). Tỷ phần các pha trong ảnh tổ chức tế vi được phân tích bằng phần mềm phân tích ảnh Image Pro plus. Mỗi giá trị đưa ra là giá trị trung bình thực hiện phân tích trên ít nhất 5 ảnh tổ chức tế vi.

Đường cong phân cực của các mẫu thí nghiệm được phân tích bằng thiết bị đo thông số điện hoá (Autolab PGSTAT302N) với điện cực so sánh Caromel, trong dung dịch 3,5% NaCl tại nhiệt độ phòng. Các thông số điện hóa được xử lý bằng phần mềm điều khiển, việc tính toán hoàn toàn tự động.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Tổ chức tế vi của thép

Tổ chức tế vi của các mẫu thép sau xử lý nhiệt được đưa ra trên Hình 2. Trong đó, Hình 2a là tổ chức tế vi của thép sau tôi ở 1100 °C và Hình 2 b-d là tổ chức tế vi của thép sau ram ở 750 °C lần lượt ở các thời gian 15, 60 và 240 phút.



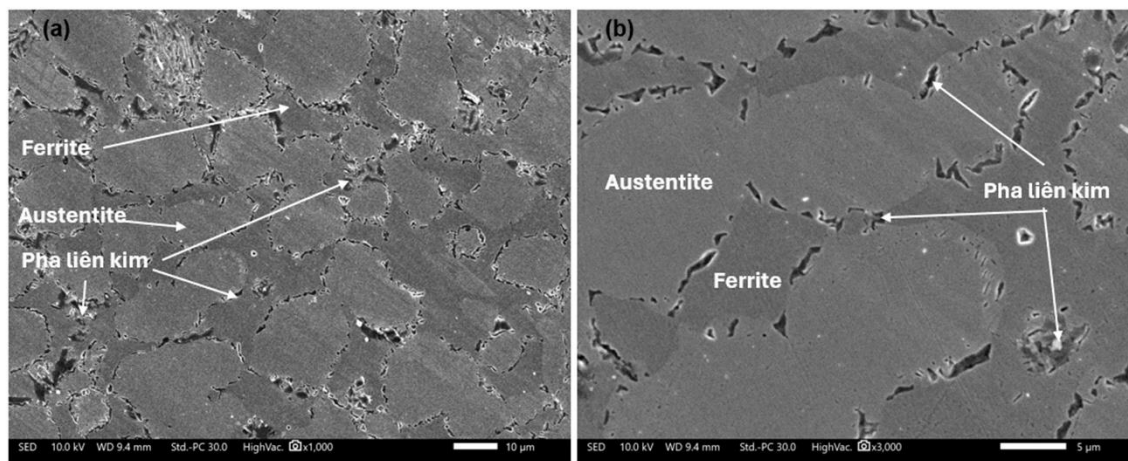
Hình 2. Ảnh tổ chức tế vi của thép sau xử lý nhiệt: (a) sau tôi 1100 °C; sau tôi 1100 °C và ram ở 750 °C trong (b) 15 phút, (c) 60 phút và (d) 240 phút

Sau tôi, tổ chức của thép gồm pha austenite - γ (màu sáng) và pha ferrite - α (màu xanh nhạt). Bằng phân tích định lượng tỷ phần pha nhờ sử dụng phần mềm phân tích ảnh Image Pro plus, tỷ phần của hai pha này xấp xỉ 45/55 trong mẫu sau tôi. Sau khi ram, trong tổ chức tế vi bắt đầu xuất hiện các pha thứ hai (pha màu nâu đen) tiết ra trên biên giới của pha austenite/ferrite. Lượng pha này càng nhiều khi thời gian giữ nhiệt ở 750 °C càng dài. Tỷ phần của pha thứ hai so với nền austenite và ferrite được phân tích định lượng qua phần mềm phân tích ảnh và đưa ra trong Bảng 2.

Bảng 2. Tỷ phần trung bình của pha thứ hai trong thép sau ram ở 750 °C trong thời gian khác nhau

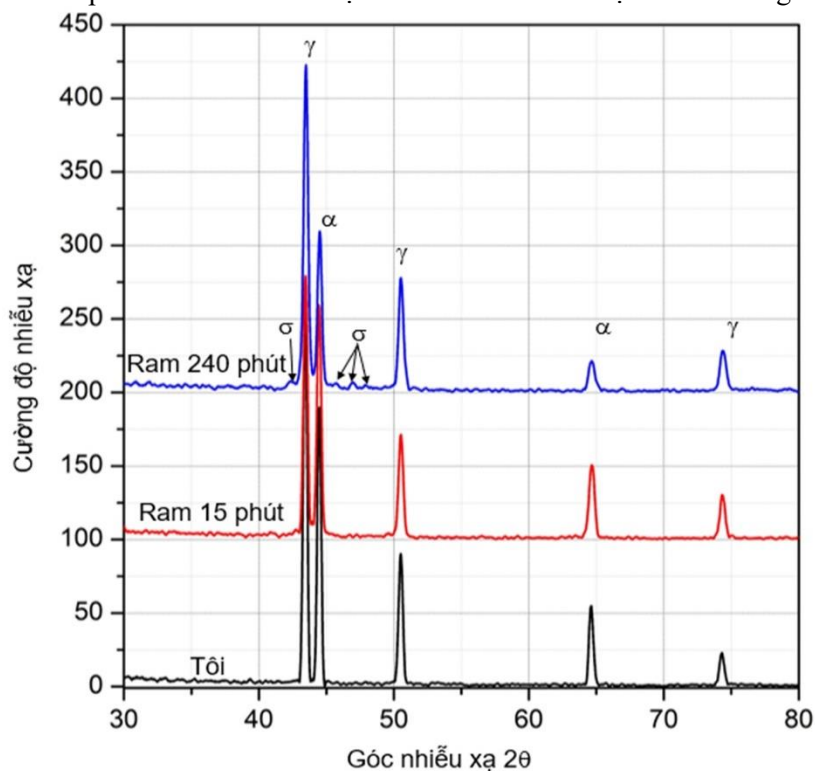
Mẫu	Nền	Pha thứ 2
Ram 750 °C – 15 phút	98,5%	1,5%
Ram 750 °C – 60 phút	90,0 %	10,0%
Ram 750 °C – 240 phút	68,1%	31,9%

Thêm vào đó, khi quan sát các vùng hình thành của pha thứ hai, chúng được tiết ra chủ yếu trên biên giới của pha austenite/ferrite và phát triển trong phần nền pha ferrite. Điều này thấy rõ hơn khi quan sát ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của mẫu giữ nhiệt 240 phút ở Hình 3.



Hình 3. Ảnh hiển vi điện tử quét của mẫu sau tôi 1100 °C và ram 240 phút ở 750 °C

Theo các thông số động học của quá trình tiết pha trong thép 2205 [3], [5], [14], các pha thứ hai trong hợp kim được hình thành trong khoảng nhiệt độ 550 – 1050 °C, đó là các pha carbides, nitrides và các pha liên kim của Fe-Cr-Mo (pha sigma σ và pha chi χ). Tại 750 °C, các pha carbide sẽ xuất hiện rất sớm sau khoảng 1-2 phút giữ nhiệt, các pha nitrides và pha liên kim sẽ xuất hiện sau khoảng 10 phút giữ nhiệt. Để xác định các pha thứ hai được tiết ra trong tổ chức tế vi của mẫu thép thí nghiệm là pha gì, phân tích nhiễu xạ tia X được thực hiện với các mẫu giữ nhiệt 15 phút và 240 phút. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu được đưa ra trong Hình 4.

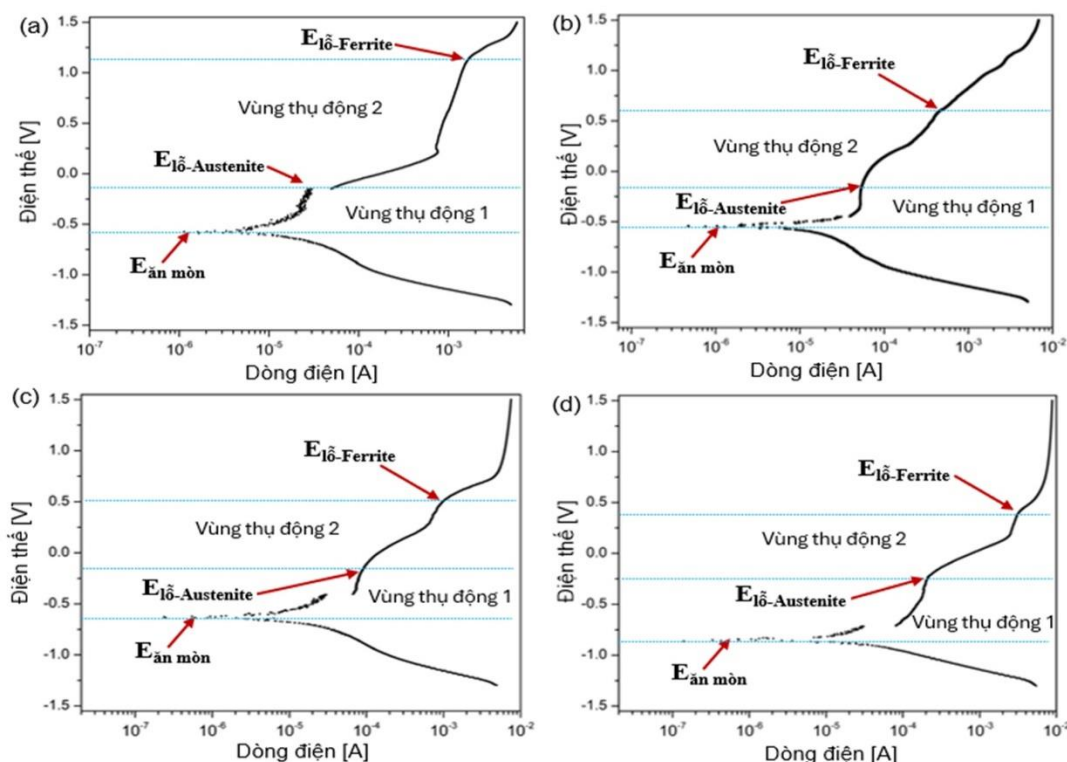


Hình 4. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu thép ở chế độ xử lý nhiệt khác nhau

Dựa vào giản đồ nhiễu xạ tia X, mẫu sau tôi chỉ có hai pha austenite và ferrite. Mẫu sau giữ nhiệt ở 750 °C trong 15 phút không thấy có peak của pha carbides nào xuất hiện, chỉ thấy có peak của pha liên kim sigma σ bắt đầu xuất hiện với cường độ rất nhỏ. Khi tăng thời gian ram lên 240 phút, chỉ có peak của pha sigma tăng cường độ. Điều này hoàn toàn phù hợp với tỷ phần pha thứ hai phân tích được qua ảnh tổ chức tế vi của mẫu thép trong Hình 2 và Hình 3. Đồng thời, theo nhiều tài liệu nghiên cứu [3], [11], do Cr khuếch tán trong pha ferrite dễ dàng hơn trong pha austenite, pha sigma hình thành và phát triển trong pha ferrite, làm lượng pha ferrite bị giảm đi. Trên giản đồ nhiễu xạ tia X cũng thấy rõ, khi cường độ peak của pha sigma tăng lên thì cường độ peak của pha ferrite giảm đi (thấy rất rõ ở mẫu ram 240 phút với lượng pha sigma lớn). Qua đây có thể thấy, pha được hình thành chủ yếu khi giữ nhiệt tại 750 °C là pha liên kim sigma. Các pha thứ hai khác có thể có, tuy nhiên, với lượng nhỏ chưa phát hiện được bằng phân tích nhiễu xạ tia X. Lưu ý rằng hàm lượng C và N trong thép rất nhỏ, dẫn đến nếu các pha carbides và nitrides hình thành thì tỷ phần sẽ rất nhỏ.

3.2. Đặc điểm đường cong phân cực

Với dòng thép không gỉ duplex, ngoài điện thế ăn mòn ($E_{\text{ăn mòn}}$), thông số về điện thế ăn mòn lỗ của pha austenite ($E_{\text{lỗ-Austenite}}$) và của pha ferrite ($E_{\text{lỗ-Ferrite}}$) được coi là những thông số quan trọng để đánh giá về khả năng bền ăn mòn của thép [15], [16]. Để thấy được ảnh hưởng của pha thứ hai đến các giá trị này của thép, đường cong phân cực của thép ở các chế độ xử lý nhiệt khác nhau được xác định và chỉ ra trên Hình 5. Số liệu được tổng hợp trong Bảng 3.



Hình 5. Đường cong phân cực của thép không gỉ 2205: (a) sau tôi ở 1100 °C; sau tôi ở 1100 °C và ram ở 750 °C trong (b) 15 phút, (c) 60 phút và (d) 240 phút

Kết quả về các thông số điện hóa của đường cong phân cực của các mẫu thép cho thấy tính chất bền ăn mòn của thép 2205 của các mẫu ram đều giảm đi so với mẫu tôi, thời gian ram càng dài thì tính bền ăn mòn càng kém. Với mẫu ram 15 phút ở 750 °C, mặc dù điện thế ăn mòn không thay đổi nhưng điện thế ăn mòn lỗ của pha austenite và ferrite đều giảm so với mẫu tôi. Đặc biệt

là điện thế ăn mòn lỗ của pha ferrite, giảm từ 1,13 V xuống 0,63 V (giảm 44%). Chính vì lý do này, dòng ăn mòn và tốc độ ăn mòn đều tăng lên so với mẫu tôi. Các giá trị điện thế ăn mòn bắt đầu giảm đi đáng kể với mẫu có thời gian ram là 60 phút và 240 phút. Điện thế ăn mòn giảm từ -0,59 V xuống -0,64 V (mẫu ram 60 phút) và -0,88 V (mẫu ram 240 phút). Điện thế ăn mòn lỗ của pha ferrite giảm từ 1,13 V xuống 0,52 V - giảm 54% (mẫu ram 60 phút) và 0,38 V - giảm 66% (mẫu ram 240 phút). Điều đáng chú ý, điện thế ăn mòn austenite gần như không giảm so với mẫu tôi với các mẫu ram 15 phút và 60 phút, chỉ giảm đáng kể với mẫu ram 240 phút từ -0,13 V xuống -0,25 V (giảm ~50%). Tuy nhiên, điện thế ăn mòn của pha ferrite liên tục giảm khi thời gian ram tăng dần. Điều này hoàn toàn phù hợp với tổ chức tế vi đã phân tích ở Hình 2. Việc hình thành các pha thứ hai, làm pha ferrite bị nghèo Cr. Do đó, điện thế ăn mòn của pha này càng giảm nếu lượng pha thứ hai tiết ra càng nhiều, đặc biệt là pha sigma vì %Cr trong pha sigma lên đến 30%. Như vậy, việc hình thành pha thứ hai trong thép, dù rất nhỏ khoảng 1,5% cũng làm tính bền ăn mòn của thép giảm đi đáng kể.

Bảng 3. Thông số của đường cong phân cực của các mẫu thép ở chế độ xử lý nhiệt khác nhau

Mẫu	$E_{\text{ăn mòn}}$, V	$I_{\text{ăn mòn}}$, A	Tốc độ ăn mòn, m/năm	$E_{\text{lỗ-Austenite}}$, V	$E_{\text{lỗ-Ferrite}}$, V
Tôi 1100 °C	-0,59	$7,5 \times 10^{-6}$	0,019	-0,13	1,13
Ram 15 phút	-0,54	$8,3 \times 10^{-6}$	0,021	-0,14	0,63
Ram 60 phút	-0,64	$9,7 \times 10^{-6}$	0,024	-0,14	0,52
Ram 240 phút	-0,88	$1,1 \times 10^{-5}$	0,029	-0,25	0,38

4. Kết luận

Pha thứ hai đặc biệt pha liên kim sigma là một điểm yếu của thép không gỉ duplex. Dựa vào kết quả của nghiên cứu, một số kết luận được đưa ra như sau. Một là, pha thứ hai được tiết ra trong thép 2205 khoảng 1,5% chỉ sau 15 phút thép được giữ nhiệt ở 750 °C, mặc dù đây không phải là nhiệt độ dễ hình thành pha thứ hai nhất của dòng thép này. Điều này làm giảm điện thế ăn mòn lỗ của pha ferrite trong thép khoảng 44%. Hai là, pha thứ hai sinh ra chủ yếu là pha liên kim sigma, hình thành trên biên giới pha austenite/ferrite, phát triển vào trong pha ferrite, làm giảm điện thế ăn mòn của pha này và làm giảm tính bền ăn mòn của thép. Ba là, pha thứ hai tiết ra càng nhiều nếu thời gian giữ nhiệt càng dài. Điều này khuyến cáo rằng, với thép không gỉ duplex 2205, việc xử lý nhiệt hoặc hàn thép đặc biệt cần hạn chế thời gian giữ nhiệt hoặc làm nguội chậm thép qua vùng nhiệt độ dễ hình thành pha thứ hai (550-1000 °C) để tránh làm giảm tính bền ăn mòn của thép. Sự ảnh hưởng của sự tiết pha Fe-Cr-Mo trong thép AISI 2205 với tỷ phần pha austenite và ferrite khác nhau đến tính bền ăn mòn của thép sẽ được trình bày ở nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. Francis and G. Byrne, "Duplex Stainless Steels—Alloys for the 21st Century," *Metals*, vol. 11, no. 5, 2021, Art. no. 836.
- [2] D. Zhang, A. Liu, B. Yin, and P. Wen, "Additive manufacturing of duplex stainless steels - A critical review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 73, pp. 496-517, 2022.
- [3] R. Wang, "Precipitation of sigma phase in duplex stainless steel and recent development on its detection by electrochemical potentiokinetic reactivation: A review," *Corrosion Communications*, vol. 2, pp. 41-54, 2021.
- [4] Y. Han *et al.*, "A short review on the role of alloying elements in duplex stainless steels," *Tungsten*, vol. 5, no. 4, pp. 419-439, 2023.
- [5] S. Kahar, "Duplex Stainless Steels-An overview," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 07, pp. 27-36, 2017.
- [6] P. S. Gowthaman, S. Jeyakumar, and B. A. Saravanan, "Machinability and tool wear mechanism of Duplex stainless steel – A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 1423-1429, 2020.

-
- [7] A. Kashiwar, N. P. Vennela, S. L. Kamath, and R. K. Khatirkar, "Effect of solution annealing temperature on precipitation in 2205 duplex stainless steel," *Materials Characterization*, vol. 74, pp. 55-63, 2012.
- [8] J. Verma and R. V. Taiwade, "Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 134-152, 2017.
- [9] L. K. de P. Inácio, W. Wolf, B. C. B. de Leucas, G. C. Stumpf, and D. B. Santos, "Microtexture evolution of sigma phase in an aged fine-grained 2205 duplex stainless steel," *Materials Characterization*, vol. 171, 2021, Art. no. 110802.
- [10] N. Haghdadi *et al.*, "Evolution of microstructure and mechanical properties in 2205 duplex stainless steels during additive manufacturing and heat treatment," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 835, 2022, Art. no. 142695.
- [11] N. Llorca-Isern, H. López-Luque, I. López-Jiménez, and M. V. Biezma, "Identification of sigma and chi phases in duplex stainless steels," *Materials Characterization*, vol. 112, pp. 20-29, 2016.
- [12] G. N. Nigon, O. Burkan Isgor, and S. Pasebani, "The effect of annealing on the selective laser melting of 2205 duplex stainless steel: Microstructure, grain orientation, and manufacturing challenges," *Optics & Laser Technology*, vol. 134, 2021, Art. no. 106643.
- [13] J. Li, C. W. Du, Z. Y. Liu, X. G. Li, and M. Liu, "Effect of microstructure on the corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel. Part 1: Microstructure evolution during isothermal aging at 850 °C and evaluation of anticorrosion properties by methods of cyclic potentiodynamic polarization and electrochemical impedance tests," *Construction and Building Materials*, vol. 189, pp. 1286-1293, 2018.
- [14] D. C. dos Santos and R. Magnabosco, "Kinetic Study to Predict Sigma Phase Formation in Duplex Stainless Steels," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, no. 4, pp. 1554-1565, 2016.
- [15] R. Silva *et al.*, "New insights into the hardening and pitting corrosion mechanisms of thermally aged duplex stainless steel at 475 °C: A comparative study between 2205 and 2101 steels," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 98, pp. 123-135, 2022.
- [16] H. Luo, C. Dong, K. Xiao, and X. Li, "Characterization of passive film on 2205 duplex stainless steel in sodium thiosulphate solution," *Applied Surface Science*, vol. 258, pp. 631-639, 2011.