



DOI:10.22144/ctujos.2026.095

## ỨNG DỤNG KỸ THUẬT TƯƠNG PHẢN KÊNH ĐIỆN TỬ (ECCI) NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ LAN TRUYỀN VẾT NỨT GIÁN ĐOẠN TRONG HỢP KIM FE-SI

Huỳnh Thanh Thương\*, Bùi Văn Hữu, Nguyễn Công Khải, Cao Hoàng Tiến và Nguyễn Văn Cường

Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): thanhthuong@ctu.edu.vn

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 23/02/2026

Sửa bài (Revised): 04/05/2026

Duyệt đăng (Accepted): 20/05/2026

**Title:** Application of Electron Channelling Contrast Imaging (ECCI) to Investigate the Mechanism of Discontinuous Crack Propagation in Fe-Si Alloy

**Author(s):** Huỳnh Thanh Thương\*, Bùi Văn Hữu, Nguyễn Công Khải, Cao Hoàng Tiến and Nguyễn Văn Cường

**Affiliation(s):** Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

### TÓM TẮT

Kỹ thuật tương phản kênh điện tử (Electron Channelling Contrast Imaging – ECCI) được áp dụng nhằm làm sáng tỏ cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn trong hợp kim Fe-3 wt%Si đơn tinh thể chịu tải kéo trong môi trường không khí. Kết quả từ các quan sát dưới bề mặt cho thấy sự hoạt hóa đối xứng của các hệ trượt và sự hình thành các dải trượt có khoảng cách đều đặn phát ra từ đầu vết nứt. Các dải trượt giao cắt và cấu trúc lệch mạng được xác định phía trước đầu vết nứt, hình thành nên các cấu trúc lệch mạng có vai trò cản trở cục bộ sự tiến triển của vết nứt. Khoảng cách giữa các lệch mạng này trùng khớp với khoảng cách vân sọc quan sát trên bề mặt phá hủy, cho thấy bước phát triển của vết nứt được chi phối bởi sự sắp xếp nội tại của lệch mạng thay vì chiều dài vết nứt tổng thể. Một cơ chế chịu sự điều khiển của vi cấu trúc, bao gồm chu kỳ phát xạ lệch mạng, hóa bền biến dạng, tiến triển và dừng vết nứt, được đề xuất.

**Từ khóa:** Biến dạng đầu vết nứt, đơn tinh thể, hợp kim Fe-3 wt%Si  
Phát triển vết nứt

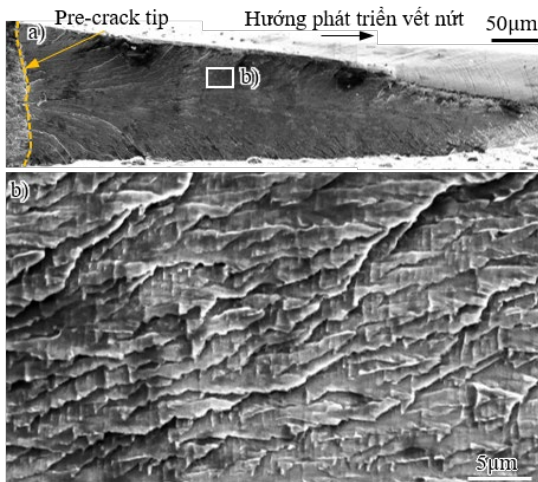
### ABSTRACT

Electron Channelling Contrast Imaging (ECCI) was applied to elucidate the mechanism of discontinuous crack propagation in a single-crystalline Fe-3 wt%Si alloy subjected to tensile loading in air. Subsurface observations revealed symmetrically activated slip systems and regularly spaced slip bands emitted from the crack tip. Intersecting slip bands and dislocation cell structures were identified ahead of the crack tip, forming low-energy dislocation structures that locally hinder crack advance. The spacing of these dislocation features was found to coincide with the striation spacing observed on the fracture surface, indicating that crack growth increments are governed by intrinsic dislocation arrangements rather than global crack length. A microstructure-controlled mechanism involving cyclic dislocation emission, work hardening, crack advance, and arrest is proposed.

**Keywords:** Crack growth, crack tip deformation, Fe-3 wt%Si alloy, single crystal

## 1. GIỚI THIỆU

Thép là vật liệu nền tảng của ngành công nghiệp hiện đại và môi trường xây dựng, kết hợp giữa độ bền cao, độ dẻo dai và khả năng chịu tải với khả năng điều chỉnh tính chất theo từng mức thép để phù hợp với nhiều điều kiện làm việc khác nhau. Trong xây dựng, thép tạo thành khung kết cấu chính của cầu và nhà cao tầng, đồng thời đóng vai trò cốt thép trong bê tông, nơi độ tin cậy dưới tải trọng lớn và biến thiên là yêu cầu thiết yếu. Trong cơ khí và chế tạo, khả năng gia công tốt cùng với tính chống mài mòn cân bằng giúp thép trở thành vật liệu chủ đạo cho máy móc, dụng cụ, linh kiện ô tô và thiết bị công nghiệp trong nhiều lĩnh vực khác nhau (Moynihan & Julian, 2014). Trong bối cảnh đó, các vết nứt dạng khuyết tật có ý nghĩa đặc biệt quan trọng vì chúng làm suy giảm độ bền, độ dai và tuổi thọ làm việc, thường vượt xa những gì các tính chất danh nghĩa của vật liệu có thể dự đoán. Các vết nứt này có thể hình thành trong quá trình đúc, hàn hoặc xử lý nhiệt, hoặc phát sinh dưới tải trọng chu kỳ, bắt nguồn từ ứng suất dư, sự phân tách tạp chất hoặc quá trình làm nguội nhanh. Khi xuất hiện, chúng biến các kết cấu vốn bền vững thành những hệ thống nhạy cảm với hư hỏng, nhấn mạnh nhu cầu phát hiện sớm và áp dụng các biện pháp kiểm soát phòng ngừa trong cả lĩnh vực dân dụng và cơ khí (Kromm et al., 2020; Liu & McMahon, 2009; Shen et al., 2023).



**Hình 1. Bề mặt phá hủy của mẫu**

Ghi chú: (a) bề mặt phá hủy ở độ phóng đại nhỏ, (b) ảnh phóng to của bề mặt phá hủy cho thấy các vân sọc (striations).

Sự lan truyền vết nứt từ các khuyết tật nhỏ đặc biệt nguy hiểm: dưới tác động của tải trọng chu kỳ hoặc môi trường, các khuyết tật ban đầu chưa tới hạn

có thể phát triển dần dần, làm suy giảm tính toàn vẹn kết cấu và trong những trường hợp cực đoan có thể gây phá hủy đột ngột, mang tính thảm khốc mà không có cảnh báo trước. Do đó, việc hạn chế kích thước khuyết tật ban đầu và giám sát liên tục sự phát triển của vết nứt là yếu tố then chốt bảo đảm an toàn và độ tin cậy của kết cấu thép (Inês et al., 2023; Stewart, 2021; Vakili et al., 2024). Biến dạng dẻo chi phối phần lớn quá trình tiến triển này thông qua việc tái phân bố ứng suất, cũng như biến dạng dẻo sẽ hấp thụ năng lượng và làm cùn đầu vết nứt. Tuy nhiên, biến dạng dẻo quá mức giúp thúc đẩy tích lũy hư hỏng và có thể kích hoạt sự lan truyền không ổn định dẫn đến phá hủy cuối cùng (Nanninga et al., 2010; Pippin & Hohenwarter, 2017; Ritchie et al., 2000). Ở cấp độ vi mô, các hiện tượng này bị chi phối bởi lệch mạng; chuyển động của chúng dọc theo các hệ trượt cho phép biến dạng dư xảy ra ở mức ứng suất tương đối thấp, trong khi sự tương tác và nhân lên của lệch mạng tạo ra hóa bền biến dạng, từ đó làm thay đổi đáp ứng vĩ mô của thép (Nes, 1997). Kỹ thuật tương phản kênh điện tử (Electron Channeling Contrast Imaging – ECCI) trong kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho phép tiếp cận trực tiếp các cơ chế này như nhận diện loại, mật độ và sự sắp xếp của lệch mạng, đồng thời làm rõ sự tương tác của chúng với biên giới hạt, pha kết tủa và khuyết tật xếp lớp, qua đó liên kết sự tiến hóa vi cấu trúc với quá trình khởi tạo và lan truyền vết nứt (Pang et al., 2017; Picard et al., 2014; Zaefferer & Nahid, 2014; Zhang & Zaefferer, 2015).

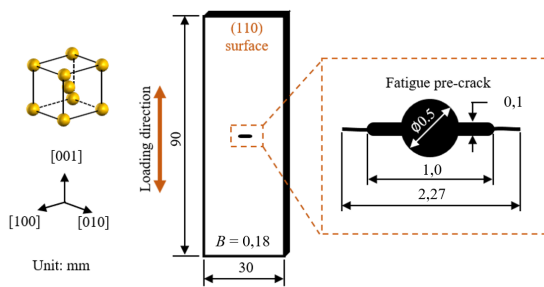
Ngoài ra, các hợp kim đơn tinh thể không chịu ảnh hưởng của biên giới hạt và sự hình thành pha hydride; do đó, chúng thường được ưu tiên sử dụng để chế tạo mẫu nghiên cứu cơ chế lan truyền vết nứt. Huynh et al. (2021) đã nghiên cứu cơ chế phát triển vết nứt trong thép sử dụng hợp kim Fe–Si đơn tinh thể; kết quả cho thấy sự lan truyền vết nứt xảy ra theo dạng gián đoạn và gắn liền với biến dạng dẻo, được thể hiện qua các vân sọc (striations) trên bề mặt phá hủy. Hình 1 thể hiện toàn bộ bề mặt phá hủy và ảnh phóng đại cao cho thấy rõ các vân sọc đặc trưng (Huynh et al., 2021). Đáng chú ý, sự lan truyền vết nứt gián đoạn có tốc độ chậm hơn so với lan truyền liên tục; do đó, cần nhiều thời gian hơn để vết nứt đạt tới chiều dài tới hạn dẫn đến phá hủy không ổn định. Mặt khác, sự lan truyền gián đoạn gắn liền với biến dạng dẻo đã cho thấy quá trình này hấp thụ năng lượng trong suốt quá trình phát triển vết nứt. Điều này dẫn đến đường cong sức cản lan truyền vết nứt tăng dần, góp phần nâng cao độ an toàn của kết cấu thép. Vì vậy, việc nghiên cứu đặc trưng lệch

mạng liên quan đến lan truyền vết nứt gián đoạn trong hợp kim Fe-Si là cần thiết.

Mặc dù kỹ thuật ECCI đã được áp dụng trong các nghiên cứu trước để quan sát đặc trưng lệch mạng, các phân tích chủ yếu dừng lại ở việc mô tả hiện tượng (Huynh et al., 2021). Vai trò chi phối của cấu trúc lệch mạng dưới bề mặt đối với cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn vẫn chưa được làm rõ một cách hệ thống. Trong nghiên cứu này, ECCI không chỉ được sử dụng như một công cụ quan sát, mà còn được khai thác để thiết lập mối liên hệ trực tiếp giữa sự tiến hóa của cấu trúc lệch mạng (dải trượt, cấu trúc giao cắt, tế bào lệch mạng) và hành vi lan truyền vết nứt ở cấp độ vĩ mô.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

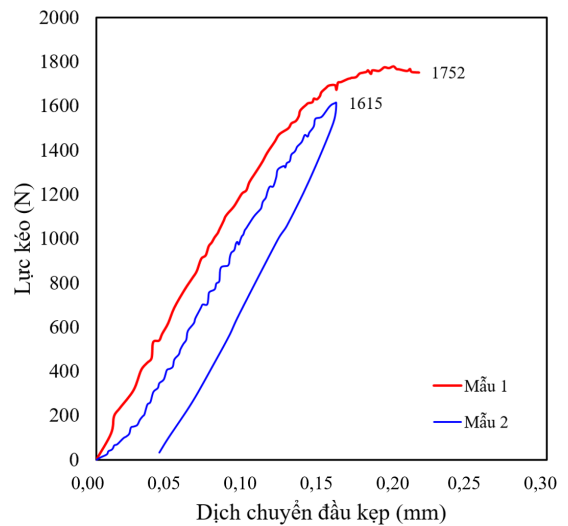
Hai mẫu hình chữ nhật (90 mm × 30 mm × 0,18 mm, ký hiệu mẫu 1 và mẫu 2 được cắt từ một tấm thép mỏng của hợp kim Fe-3 wt%Si đơn tinh thể có định hướng mặt l (110). Hình dạng mẫu và phương định hướng tinh thể được thể hiện sơ đồ trong Hình 2. Quy trình tạo rãnh khuyết (notch) và vết nứt (pre-crack) đã được mô tả trong các nghiên cứu trước đây (Huynh et al., 2021). Giới hạn chảy ( $\sigma_y$ ) của vật liệu theo phương [001] được đo là 290 Mpa (Huynh et al., 2020). Chiều dài vết nứt mỗi (2a) của mẫu 1 và mẫu 2 lần lượt là 1,60 và 1,64 mm. Các mẫu được kéo liên tục trong môi trường không khí ở nhiệt độ phòng dưới điều khiển chuyển vị bằng máy thử kéo điện - thủy lực (tốc độ dịch chuyển đầu kéo: 0,0017 mm/giây). Cụ thể, chuyển vị đầu kéo của mẫu 1 và mẫu 2 được dừng lần lượt tại 0,20 và 0,16 mm. Ở mẫu 1, việc quan sát thấy vết nứt lan truyền một đoạn ngắn ( $\Delta a = 150 \mu\text{m}$ , tải trọng tại thời điểm dừng  $P = 1752 \text{ N}$  và hệ số cường độ ứng suất tại thời điểm dừng  $K = 17,9 \text{ MPam}^{1/2}$ ), trong khi ở mẫu 2 chỉ ghi nhận hiện tượng làm tù đầu vết nứt (không có sự lan truyền vết nứt, tải trọng tại thời điểm dừng  $P = 1615 \text{ N}$  và hệ số cường độ ứng suất tại thời điểm dừng  $K = 15,3 \text{ MPam}^{1/2}$ ). Đường cong quan hệ giữa chuyển vị đầu kéo và tải trọng của hai mẫu được trình bày trong Hình 3.



Hình 2. Hình dạng và định hướng mẫu thử nghiệm

Sau quá trình thử nghiệm cơ học, hình thái bề mặt phá hủy và bề mặt bên của các mẫu được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM) ở điện áp gia tốc 15 kV. Để quan sát đặc trưng cấu trúc lệch mạng tại vùng giữa bề dày, các mẫu sau khi phá hủy được đông kết trong nhựa. Sau đó, một nửa bề dày mẫu được loại bỏ bằng mài cơ học tuần tự sử dụng giấy nhám cacbua silic P800, P1200, P1500 và P4000. Thời gian mài với mỗi loại giấy nhám khoảng 2 phút. Tiếp theo, mẫu được đánh bóng cơ học bằng dung dịch kim cương đơn tinh thể kích thước 9  $\mu\text{m}$  và 3  $\mu\text{m}$ , mỗi bước khoảng 5 phút. Cuối cùng, mẫu được đánh bóng tinh bằng dung dịch silica kích thước hạt 50 nm trong khoảng 15 phút. Sự sắp xếp lệch mạng được khảo sát bằng kỹ thuật ECCI ở điện áp 30 kV trên thiết bị Zeiss Ultra55.

Cần lưu ý rằng quy trình thử kéo và các thông số cơ học tương ứng (Hình 3) của các mẫu đã được báo cáo và phân tích chi tiết trong nghiên cứu trước đây (Huynh et al., 2021). Trong nghiên cứu hiện tại, các mẫu sau thử nghiệm được sử dụng lại nhằm mục đích khảo sát bổ sung cấu trúc lệch mạng và đặc trưng vi cấu trúc dưới bề mặt bằng kỹ thuật ECCI. Do đó, bài báo này không tập trung lặp lại phân tích cơ học vĩ mô mà nhằm làm rõ cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn trên cơ sở bằng chứng vi cấu trúc trực tiếp.

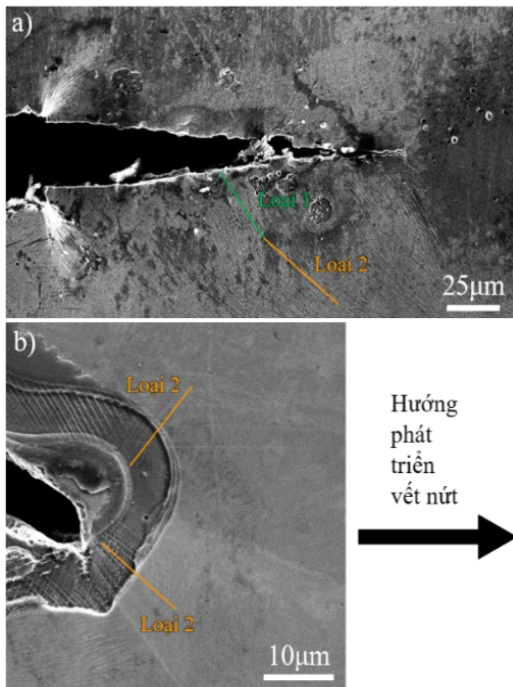


Hình 3. Đồ thị biểu diễn độ dịch chuyển của đầu kẹp và tải trọng

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 4a thể hiện các vết trượt trên bề mặt bên của mẫu 1, mẫu này xuất hiện sự lan truyền vết nứt một đoạn ngắn trong môi trường không khí. Vết nứt nằm ở phía bên phải của rãnh khuyết. Có thể quan

sát thấy hai loại vết trượt (loại 1 và loại 2) trong hình, được hình thành do biến dạng trong mặt phẳng và ngoài mặt phẳng (in-plane and out-of-plane deformation) trong quá trình lan truyền vết nứt. Hình 4b cho thấy các vết trượt tại bề mặt bên gần đầu vết nứt của mẫu 2, trong đó chỉ quan sát thấy các vết trượt loại 2. Các vết trượt đứng tại đầu vết nứt tương tự như trong Hình 4a, nơi xuất hiện biến dạng dẻo đáng kể trước khi vết nứt lan truyền. Việc nghiên cứu sâu hơn được thực hiện bằng ECCI và EBSD nhằm xác định trạng thái ứng suất nào góp phần tạo nên từng loại vết trượt.



**Hình 4. Ảnh kính hiển vi điện tử từ mặt bên của (a) mẫu 01 và (b) mẫu 02**

Hình 5 trình bày tập hợp ảnh ECC và phân tích EBSD trên mặt cắt sau khi loại bỏ khoảng 60 µm vật liệu từ bề mặt bên. Các vết xước do đánh bóng được đánh dấu bằng mũi tên vàng. Trong Hình 5a, định hướng bề mặt ở vùng trung tâm phía bên phải dường như được tối ưu hóa theo điều kiện Bragg (Bragg condition), thể hiện dưới dạng tương phản tối. Các vùng còn lại có tương phản sáng do sự phát triển biến dạng dẻo, xuất phát từ độ dốc định hướng liên quan đến lệch mạng. Trước hết, cấu trúc lệch mạng tổng thể bao gồm các vùng đã trượt và chưa trượt, được đánh dấu bằng đường nét màu vàng trong Hình 5c. Các dải trượt được phát ra từ đầu vết nứt theo hai hướng  $[111]$  và  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ , đối xứng qua mặt phẳng vết nứt như thể hiện trong Hình 5b. Điều này được xác nhận bằng phân tích EBSD khi các hướng  $\langle 111 \rangle$  đều

được hiển thị trong Hình 5c. Các đường trượt này phù hợp với vết trượt loại 2 trong Hình 4. Các hệ trượt khả dĩ tương ứng với điều kiện biến dạng phẳng (plane strain conditions) là  $\{112\}\langle 111 \rangle$  và  $\{110\}\langle 111 \rangle$ , đồng thời cũng đối xứng qua mặt phẳng vết nứt.

Đáng chú ý, ở các vùng phía trên (nhưng cách xa) và phía dưới mặt phẳng vết nứt xuất hiện các “đường giao cắt” của cấu trúc lệch mạng, được hình thành do sự giao nhau của các dải trượt theo hai hướng  $[111]$  và  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ . Hiện tượng này thấy rõ ở vùng dưới mặt phẳng vết nứt trong Hình 5c. Việc quan sát chi tiết hơn cho thấy các dải song song theo hướng  $[111]$ , với khoảng cách giữa các dải gần như không đổi. Đồng thời, việc quan sát thêm ở vùng chưa trượt phía dưới mặt phẳng vết nứt (được khoanh bằng khung nét đứt trong Hình 5d cũng đã cho thấy các dải trượt theo hướng  $[111]$  (loại 2).

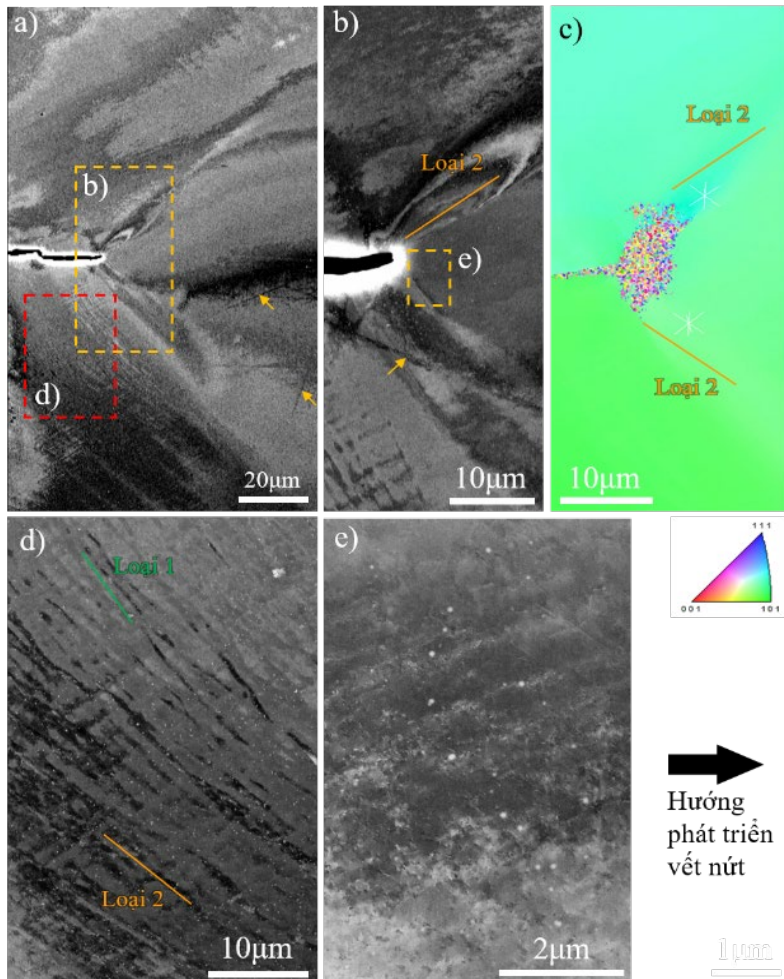
Hình 6 thể hiện các ảnh ECC trên mặt cắt tương ứng với cùng vùng trong Hình 5, sau khi tiếp tục loại bỏ thêm khoảng 20 µm vật liệu theo chiều bề dày. Các vết xước do đánh bóng được đánh dấu bằng mũi tên vàng. Các dải trượt phát ra theo hai hướng ( $[111]$  và  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ ) vẫn được quan sát, tương tự như trong Hình 5a. Ngoài ra, các vùng “đường giao cắt” xuất hiện rõ hơn phía trên và phía dưới mặt phẳng vết nứt. Việc quan sát kỹ vùng “đường giao cắt” gần bề mặt phá hủy (Hình 6c) cho thấy các dải trượt phát ra từ đầu vết nứt trong quá trình lan truyền, được chỉ bằng mũi tên hồng. Đáng chú ý, khoảng cách giữa các dải này trùng với khoảng cách vân sọc quan sát trên bề mặt phá hủy (Hình 1b). Cấu trúc lệch mạng phía trước đầu vết nứt khá mờ, dường như mật độ lệch mạng cao; tuy nhiên, điều này có thể do plastic relaxation khi tải trọng được dừng và tháo dỡ từ từ. Ở vùng xa hơn khỏi đầu vết nứt, xuất hiện cấu trúc tế bào như thể hiện trong Hình 6d.

Ảnh ECC của mẫu 2 (Hình 7), sau khi loại bỏ khoảng 50 µm vật liệu từ bề mặt bên, cho thấy không xuất hiện các dải trượt theo hai hướng  $[111]$  và  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ . Thay vào đó, việc quan sát chỉ cho thấy các dải trượt tương ứng với vết trượt trên bề mặt bên. Tương tự mẫu 1, một cấu trúc tế bào lệch mạng (dislocation cell) được quan sát phía trước đầu vết nứt trong Hình 7b. Một lần nữa, khoảng cách giữa các tế bào này trùng với khoảng cách vân sọc trên bề mặt phá hủy. Các vết xước do đánh bóng được đánh dấu bằng mũi tên vàng.

Dựa trên các quan sát vi mô của bề mặt phá hủy, bề mặt bên và cấu trúc lệch mạng bên trong mẫu, chúng tôi đề xuất một mô hình cho cơ chế lan truyền

vết nứt gián đoạn. Cơ chế tương tự trong môi trường không khí đã được trình bày trong nghiên cứu trước (Huynh et al., 2021). Tuy nhiên, ở đây chúng tôi tập

trung vào lý do vết nứt lan truyền theo dạng gián đoạn cũng như tại sao khoảng cách vân sọc không đều và độc lập với chiều dài vết nứt.



**Hình 5. Một tập hợp các hình ảnh ECC và phân tích EBSD của bề mặt mặt cắt ngang sau khi loại bỏ khoảng 60 µm vật liệu từ bề mặt bên của mẫu 1**

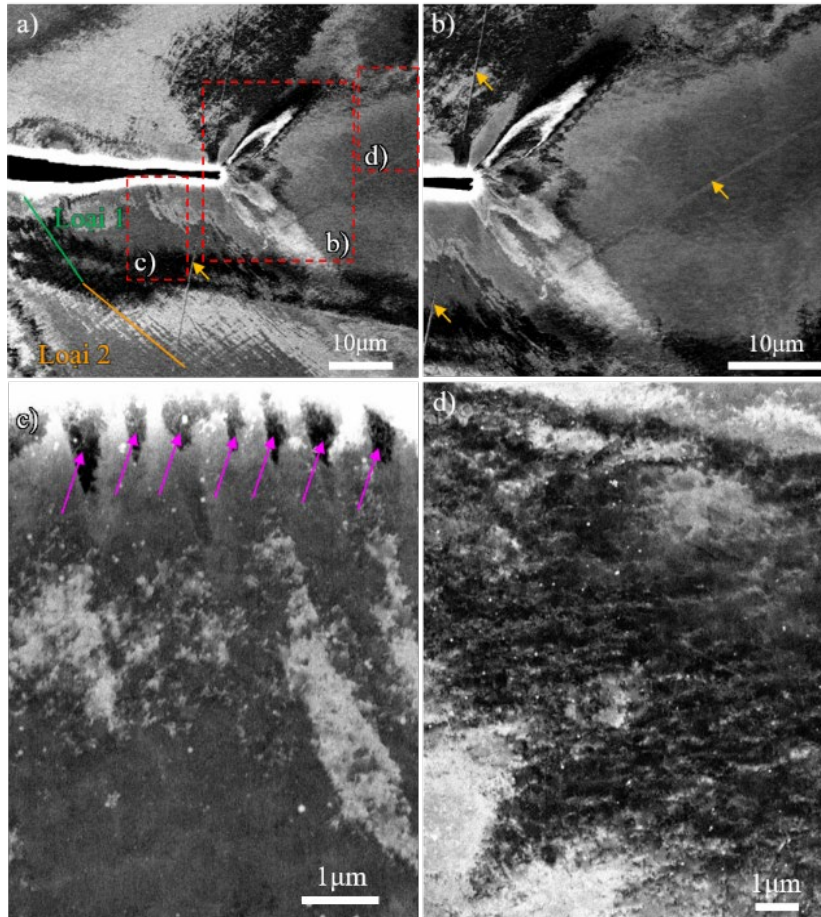
Theo mô hình đề xuất, khi tải trọng tăng, lệch mạng trước tiên được phát ra từ một phía của mặt phẳng vết nứt theo hệ trượt  $(\underline{112})[\underline{111}]$ . Ứng suất ngược (back stress) lớn hình thành tại phía này, ngăn cản đầu vết nứt tiếp tục phát triển ở phía này. Sau đó, lệch mạng được phát ra từ phía còn lại theo hệ trượt  $(\underline{112})[\underline{111}]$ . Bên cạnh các lệch mạng phát ra từ đầu vết nứt, nhiều nguồn lệch mạng phía trước đầu vết nứt cũng được kích hoạt. Các lệch mạng phát ra tại đầu vết nứt chỉ đóng góp nhỏ vào sự tiến triển của vết nứt, trong khi các lệch mạng phía trước đầu vết nứt đóng vai trò chính trong việc mở đầu vết nứt hoặc tạo biến dạng cục bộ, dẫn đến sự khởi tạo hư hỏng như lỗ rỗng hoặc nứt tế vi. Các dải trượt hoặc cấu trúc tế bào theo hệ  $(\underline{112})[\underline{111}]$  và  $(\underline{112})[\underline{111}]$

được hình thành phía trước đầu vết nứt. Khi các vết nứt tế vi hợp nhất với vết nứt chính, vết nứt mới tiếp tục lan truyền dưới tác dụng của tải trọng bên ngoài tăng dần. Tuy nhiên, khi gặp các dải trượt hoặc các tế bào lệch mạng đã hình thành phía trước, nơi tồn tại mật độ lệch mạng cao, quá trình hóa bền biến dạng làm cản trở biến dạng dẻo tại đầu vết nứt. Do đó, vết nứt bị chặn lại và cần tải trọng cao hơn để tiếp tục lan truyền. Chu kỳ này lặp lại và tạo nên hiện tượng lan truyền vết nứt gián đoạn.

Theo phân tích trường ứng suất tại đầu vết nứt của Rice (1987), dưới điều kiện biến dạng phẳng, các hệ trượt ưu tiên được hoạt hóa phía trước đầu vết nứt. Kết quả quan sát trong nghiên cứu này cho

thấy các hệ trượt đối xứng  $(112)[\underline{1}11]$  và  $(\underline{1}12)[\underline{1}11]$  phù hợp với dự đoán lý thuyết này, từ đó củng cố tính hợp lý của mô hình cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn được đề xuất. Do đó, kết quả cho thấy các hệ trượt  $(112)[\underline{1}11]$  và  $(\underline{1}12)[\underline{1}11]$  hoạt động phía trước đầu vết nứt. Lii et al. (1989) đã nghiên cứu vết trượt và cấu trúc lệch mạng phía trước vết nứt trong mẫu Fe-Si chịu tải duy trì trong môi trường hydro. Quá trình lan truyền vết nứt được

xác nhận bằng kỹ thuật phát xạ âm giòn. Các vân sọc có khoảng cách không đổi ( $1\ \mu\text{m}$ ) được quan sát trên bề mặt phá hủy. Họ nhận thấy các vết trượt rõ ràng hình thành phía trước đầu vết nứt ngay từ giai đoạn đầu biến dạng. Ngoài ra, các tế bào lệch mạng có khoảng cách khoảng  $1\ \mu\text{m}$  được hình thành cách đầu vết nứt khoảng  $20\ \mu\text{m}$  (Kuhlmann-Wilsdorf, 1987a, 1987b). Do đó, họ giả thuyết rằng sự khởi tạo, dừng và khoảng cách vân sọc có liên quan đến các cấu trúc tế bào lệch mạng này.

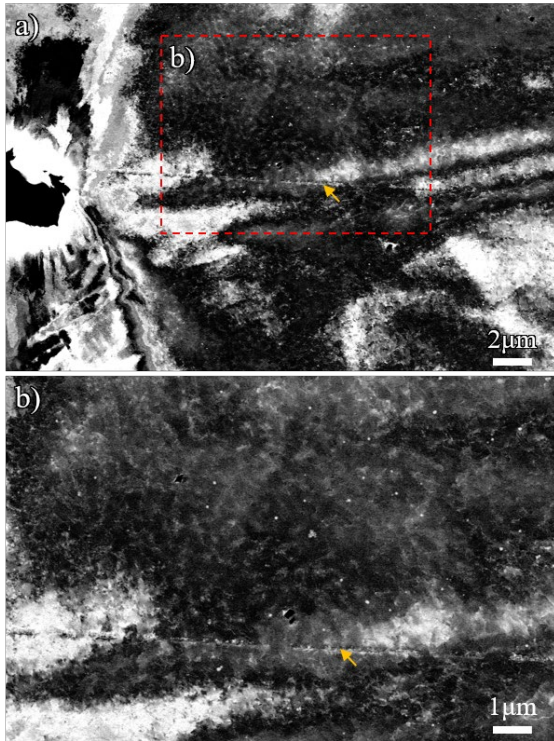


**Hình 6. Hình ảnh ECC cho thấy cấu trúc lệch mạng trong cùng các khu vực của Hình 5 sau khi loại bỏ thêm vật liệu (khoảng  $20\ \mu\text{m}$ ) theo hướng độ dày**

Những kết quả hiện tại nhấn mạnh vai trò then chốt của ECCI trong việc làm rõ cấu trúc lệch mạng dưới bề mặt liên quan đến lan truyền vết nứt gián đoạn. Trong khi kết quả phân tích bề mặt phá hủy truyền thống chỉ cho thấy các vân sọc, nó không cung cấp thông tin trực tiếp về sự sắp xếp lệch mạng chịu trách nhiệm cho sự tiến triển và dừng của vết nứt. Tương tự, việc quan sát vết trượt trên bề mặt không đủ để làm rõ cấu trúc lệch mạng ba chiều phía trước đầu vết nứt. Ngược lại, ECCI cho phép quan

sát trực tiếp các dải trượt, cấu trúc giao cắt và tế bào lệch mạng bên dưới bề mặt phá hủy mà không cần làm mỏng mẫu như trong TEM. Sự trùng khớp giữa khoảng cách dải trượt quan sát bằng ECCI và khoảng cách vân sọc trên bề mặt phá hủy cho thấy ECCI không chỉ là kỹ thuật hỗ trợ mà là công cụ quyết định để liên kết sự tiến hóa lệch mạng ở cấp vi mô với hành vi lan truyền vết nứt ở cấp vĩ mô. Do đó, cách giải thích cơ chế trong nghiên cứu này dựa

trên bằng chứng cấu trúc chỉ có thể thu được thông qua ECCI.



**Hình 7. Hình ảnh ECC hiển thị cấu trúc lệch mạng bên trong mẫu vật (gần giữa độ dày mẫu vật) của mẫu 2**

Các quan sát ECCI mang lại những hàm ý cơ chế quan trọng trong việc hiểu rõ lan truyền vết nứt gián đoạn trong hợp kim Fe–Si đơn tinh thể. Sự hiện diện của các dải trượt có khoảng cách đều và cấu trúc tế bào lệch mạng phía trước đầu vết nứt cho thấy sự tiến triển của vết nứt được điều khiển bởi một quá trình chu kỳ gồm phát xạ lệch mạng, tích tụ và tập trung biến dạng. Sự hình thành các cấu trúc lệch mạng năng lượng thấp và các thành tế bào đã hóa bền tạo ra sức cản cục bộ đối với biến dạng dẻo, dẫn đến sự dừng tạm thời của vết nứt. Vết nứt chỉ tiếp tục lan truyền khi tải trọng bên ngoài đủ lớn để vượt qua rào cản đã hóa bền này, tạo ra các bước lan truyền rời rạc. Khoảng cách gần như không đổi của các dải trượt, trùng với khoảng cách vân sọc, cho thấy bước phát triển của vết nứt được chi phối bởi khoảng cách nội tại của các cấu trúc lệch mạng chứ không phải bởi chiều dài vết nứt tổng thể. Như vậy, lan truyền vết nứt gián đoạn là một quá trình chịu sự điều khiển của vi cấu trúc, trong đó sự tiến hóa của sắp xếp lệch mạng quyết định nhịp điệu lan truyền và dừng của vết nứt. Những hiểu biết này được làm sáng tỏ trực tiếp nhờ ECCI, cung cấp lời giải thích

dựa trên cơ sở vật lý cho khoảng cách vân sọc không đổi và hành vi lan truyền lặp lại của vết nứt trong hợp kim này.

Cần nhấn mạnh rằng hợp kim Fe–Si đơn tinh thể trong nghiên cứu này được sử dụng như một vật liệu mô hình nhằm hạn chế ảnh hưởng của biên giới hạt và các yếu tố vi cấu trúc phức tạp khác. Nhờ đó, cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn có thể được quan sát và phân tích rõ ràng hơn trên cơ sở sự sắp xếp và tiến hóa của cấu trúc lệch mạng.

#### 4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, ECCI được áp dụng để khảo sát cấu trúc lệch mạng liên quan đến hiện tượng lan truyền vết nứt gián đoạn trong hợp kim Fe–3 wt%Si đơn tinh thể. Kết quả các quan sát cho thấy sự tiến triển của vết nứt trong môi trường không khí xảy ra theo một chuỗi lặp lại gồm phát xạ lệch mạng, tích tụ lệch mạng và hóa bền cục bộ phía trước đầu vết nứt.

Kết quả phân tích bằng ECCI cho thấy sự hoạt hóa đối xứng của các hệ trượt và sự hình thành các dải trượt có khoảng cách đều đặn phía trước đầu vết nứt. Các dải trượt giao cắt và cấu trúc tế bào lệch mạng được xác định bên dưới bề mặt phá hủy, tạo thành các cấu trúc lệch mạng năng lượng thấp đóng vai trò như những rào cản đã hóa bền cục bộ đối với sự lan truyền vết nứt. Khoảng cách giữa các dải trượt và tế bào lệch mạng này trùng khớp với khoảng cách vân sọc quan sát trên bề mặt phá hủy, cho thấy bước phát triển của vết nứt được chi phối bởi cấu trúc lệch mạng nội tại thay vì bởi chiều dài vết nứt tổng thể.

Dựa trên các kết quả này, một cơ chế lan truyền vết nứt gián đoạn chịu sự điều khiển của vi cấu trúc được đề xuất. Vết nứt tiến triển khi hoạt động lệch mạng phía trước đầu vết nứt dẫn đến hư hỏng cục bộ và sự hợp nhất vi nứt, trong khi quá trình hóa bền trong các dải trượt hoặc thành tế bào làm dừng tạm thời sự lan truyền tiếp theo. Sự lặp lại của quá trình này tạo nên hành vi lan truyền vết nứt mang tính chu kỳ đặc trưng.

Kết quả nghiên cứu này chứng minh rằng ECCI cung cấp thông tin trực tiếp và thiết yếu về sự sắp xếp lệch mạng dưới bề mặt, cho phép diễn giải cơ chế lan truyền vết nứt dựa trên cơ sở vật lý mà không thể đạt được chỉ bằng phân tích bề mặt phá hủy. Những kết quả này khẳng định ECCI là một công cụ mạnh trong việc liên kết sự tiến hóa lệch mạng với hành vi lan truyền vết nứt ở cấp độ vĩ mô trong các vật liệu tinh thể.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Huynh, T. T., Shigeru, H., Kaneaki, T., & Hiroshi, N. (2021). Microscopic examination of striation spacing during ductile crack growth in Fe-3wt%Si single-crystalline thin plates in air and hydrogen. *Materials Science and Engineering: A*, 802, 140652. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140652>
- Huynh, T. T., Motomichi, K., Yoshimasa, T., Shigeru, H., Kaneaki, T., & Hiroshi, N. (2020). Plastic Deformation Sequence and Strain Gradient Characteristics of Hydrogen-Induced Delayed Crack Propagation in Single-Crystalline Fe-Si Alloy. *Scripta Materialia*, 178, 99–103. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.11.012>
- Inês, S., Maria, Evgenii, M., Telmo, G. S., & Pedro, V. (2023). Review of Conventional and Advanced Non-Destructive Testing Techniques for Detection and Characterization of Small-Scale Defects. *Progress in Materials Science*, 138, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101155>
- Kromm, A., Lausch, T., Schroepfer, D., Rhode, M., & Kannengiesser, T. (2020). Influence of Welding Stresses on Relief Cracking during Heat Treatment of a Creep-Resistant 13CrMoV Steel Part II: Mechanisms of Stress Relief Cracking during Post Weld Heat Treatment. *Welding in the World*, 64(5), 819–29. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00881-8>
- Kuhlmann-Wilsdorf, D. (1987a). Energy Minimization of Dislocations in Low-energy Dislocation Structures. *Physica Status Solidi (a)*, 104(1), 121–44. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211040109>
- Kuhlmann-Wilsdorf, D. (1987b). LEDs: Properties and Effects of Low Energy Dislocation Structures. *Materials Science and Engineering*, 86, 53–66. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90442-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90442-3)
- Liu, X. Y., & McMahon, C. J. (2009). Quench Cracking in Steel as a Case of Hydrogen Embrittlement. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1–2), 540–41. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.08.035>
- Moynihan, M., C., & Julian, M. A. (2014). “Utilization of Structural Steel in Buildings.” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2168). <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0170>
- Lii, M., Foecke, T., Chen, X., Zielinski, W., & Gerberich, W. W. (1989). The effect of low energy dislocation structures on crack growth onset in brittle crystals. *Materials Science and Engineering: A*, 113, 327–338. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(89\)90321-3](https://doi.org/10.1016/0921-5093(89)90321-3)
- Nanninga, N., A. Slifka, Levy, Y., & White, C. (2010). “A Review of Fatigue Crack Growth for Pipeline Steels Exposed to Hydrogen. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 115(6), 437. <https://doi.org/10.6028/jres.115.030>
- Nes, E. (1997). Modelling of Work Hardening and Stress Saturation in FCC Metals. *Progress in Materials Science*, 41(3), 129–93. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(97\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(97)00032-7)
- Pang, B., Jones, I. P., Yu, L. C., Millett, J. C. F., & Glenn, W. (2017). Electron Channelling Contrast Imaging of Dislocations in a Conventional SEM. *Philosophical Magazine*, 97(5), 346–59. <https://doi.org/10.1080/14786435.2016.1262971>
- Picard, Y. N., Liu, M., Lammatao, J., Kamaladasa, R., & Graef, M. D. (2014). Theory of Dynamical Electron Channeling Contrast Images of Near-Surface Crystal Defects. *Ultramicroscopy*, 146, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2014.07.006>
- Pippan, R., & Hohenwarter, A. (2017). Fatigue Crack Closure: A Review of the Physical Phenomena. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(4), 471. <https://doi.org/10.1111/ffe.12578>
- Rice, R. J. (1987). Tensile Crack Tip Fields in Elastic-Ideally Plastic Crystals. *Mechanics of Materials*, 6(4), 317–35. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(87\)90030-5](https://doi.org/10.1016/0167-6636(87)90030-5)
- Ritchie, R. O., Gilbert, C. J., & McNaney, J. M. (2000). Mechanics and Mechanisms of Fatigue Damage and Crack Growth in Advanced Materials. *International Journal of Solids and Structures*, 37(1–2), 311–29. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00096-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00096-7)
- Shen, X., Xu, L., Jinxuan, G., Ying, L., Junyi, Q., & Zhenfei, L. (2023). Nondestructive Testing of Metal Cracks: Contemporary Methods and Emerging Challenges. *Crystals*, 14(1), 54. <https://doi.org/10.3390/cryst14010054>
- Stewart, M. (2021). Materials Selection for Pressure Vessels. *Surface Production Operations*, 93–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803722-5.00004-5>
- Vakili, M., Petr, K., Jan, K., & Zahra, G. (2024). Analysis, Assessment, and Mitigation of Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steels in the Oil and Gas Sector: A Review. *Surfaces* 2024, 7(3), 589–642. <https://doi.org/10.3390/surfaces7030040>

Zaefferer, S., & Nahid, N. E. (2014). Theory and Application of Electron Channelling Contrast Imaging under Controlled Diffraction Conditions. *Acta Materialia*, 75, 20–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.018>

Zhang, J. L., Zaefferer, S., & Raabe, D. (2015). A Study on the Geometry of Dislocation Patterns in the Surrounding of Nanoindenters in a TWIP Steel

Using Electron Channeling Contrast Imaging and Discrete Dislocation Dynamics Simulations. *Materials Science and Engineering: A*, 636, 231–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.078>