

SỬ DỤNG NGUYÊN LÝ VILLARI VÀ KỸ THUẬT NHỚ TỪ TRONG KIỂM TRA VẬT LIỆU TỪ CHỊU LỰC

Nguyễn Thị Lê Hiền, Đoàn Thành Đạt, Lê Thị Phương Nhung

Viện Dầu khí Việt Nam

Email: hienntl@vpi.pvn.vn

Tóm tắt

Tập trung ứng suất là nguyên nhân chính gây hư hỏng cấu trúc kim loại. Trong vật liệu sắt từ, tập trung ứng suất làm thay đổi từ trường gần đó và được gọi là hiệu ứng từ giảo hay hiệu ứng Villari. Phương pháp kiểm tra cấu trúc kim loại chịu lực sử dụng kỹ thuật nhớ từ (metal magnetic memory - MMM) được phát triển dựa trên hiệu ứng Villari là kỹ thuật kiểm tra không phá hủy mới, tiên tiến cho phép xác định vị trí tập trung ứng suất để dự báo sớm các hư hỏng tiềm ẩn đối với vật liệu sắt từ.

Bài báo giới thiệu nguyên lý Villari và sự phát triển của kỹ thuật nhớ từ cùng với kết quả nghiên cứu thử nghiệm của Viện Dầu khí Việt Nam (VPI) về sử dụng kỹ thuật này để chế tạo thiết bị kiểm tra cấu trúc kim loại chịu lực.

Từ khóa: Hiệu ứng Villari, kỹ thuật nhớ từ, kiểm tra không phá hủy kim loại, tập trung ứng suất, hư hỏng cấu trúc.

1. Giới thiệu

Các chi tiết, cấu trúc kim loại và đường ống đều làm việc trong điều kiện chịu tải trọng và có thể bị phá hủy do mỏi sau thời gian vận hành. Quá trình phá hủy vật liệu kim loại do mỏi được chia thành 3 giai đoạn: (i) quá trình xuống cấp vật lý hoặc/và hóa học do hư hỏng cấu trúc vi mô, (ii) khởi tạo xuất hiện các vết nứt vi mô và (iii) các vết nứt phát triển dẫn đến phá hủy vật liệu kim loại. Các nghiên cứu chỉ ra rằng giai đoạn đầu tiên thường diễn ra chậm và kéo dài, có thể chiếm đến 90% thời gian làm việc của các chi tiết, thiết bị và đường ống kim loại và khoảng 80% các sự cố, tai nạn kỹ thuật có nguyên nhân phá hủy do mỏi tại các vị trí tập trung ứng suất cục bộ. Phá hủy vật liệu do mỏi thường xảy ra ngay cả khi vật liệu làm việc với tải trọng dưới giới hạn chảy danh nghĩa của vật liệu, là dạng phá hủy không báo trước dẫn đến các thảm họa không mong muốn trong công nghiệp, đặc biệt nghiêm trọng trong công nghiệp dầu khí.

Hiện tại có nhiều phương pháp đánh giá không phá hủy (non-destructive test, NDT) như: phương pháp siêu âm (ultrasonic testing, UT), phương pháp dòng xoáy (eddy current testing, EC), kỹ thuật kiểm tra rò rỉ dòng từ thông (magnetic flux leakage testing, MFL), siêu âm sóng

dẫn hướng (LRGW),... cho phép kiểm tra, đánh giá sự suy giảm chiều dày cũng như xuất hiện và phát triển của các vết nứt trên bề mặt đường ống, thiết bị và cấu trúc kim loại. Tuy nhiên, các phương pháp này đều có hạn chế nhất định và không phát hiện được các suy giảm, xuống cấp của vật liệu do các hư hỏng vi cấu trúc trong giai đoạn đầu tiên. Việc nghiên cứu ứng dụng những kỹ thuật có thể phát hiện và cảnh báo sớm các hư hỏng có ý nghĩa khoa học và thực tiễn lớn, cho phép dự báo tuổi thọ của các công trình kim loại, đảm bảo an toàn vận hành.

Hiệu ứng từ tính đàn hồi được phát hiện bởi nhà vật lý người Ý Emilio Villari năm 1865, là hiện tượng thay đổi trạng thái từ của vật liệu dưới tác động của lực cơ học. Hiệu ứng Villari cho phép xác định lực cơ học hoặc ứng suất thông qua việc đo từ tính của vật liệu [1]. Trên cơ sở hiệu ứng Villari, kỹ thuật nhớ từ đã được phát triển đầu tiên bởi tác giả A.A. Dubov (Nga) vào cuối những năm 90 thế kỷ XX [2]. Kỹ thuật này giúp phát hiện các vị trí có hiện tượng tập trung ứng suất cục bộ trên các vật liệu sắt từ đang hoặc đã chịu tác động của lực cơ học bằng cách đo từ trường của vật liệu và mở ra phương pháp đánh giá không phá hủy mới, tiên tiến để xác định những vị trí này ngay tại các giai đoạn đầu tiên, trước khi khuyết tật vi mô xuất hiện. Đây là hướng nghiên cứu ứng dụng mới, đầy triển vọng đang được thế giới quan tâm nghiên cứu ứng dụng trong hơn 2 thập niên gần đây [3 - 12].

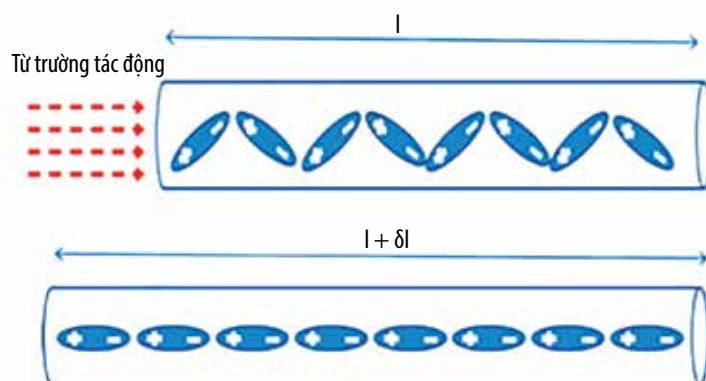
2. Nguyên lý Villari và kỹ thuật nhớ từ

2.1. Nguyên lý Villari

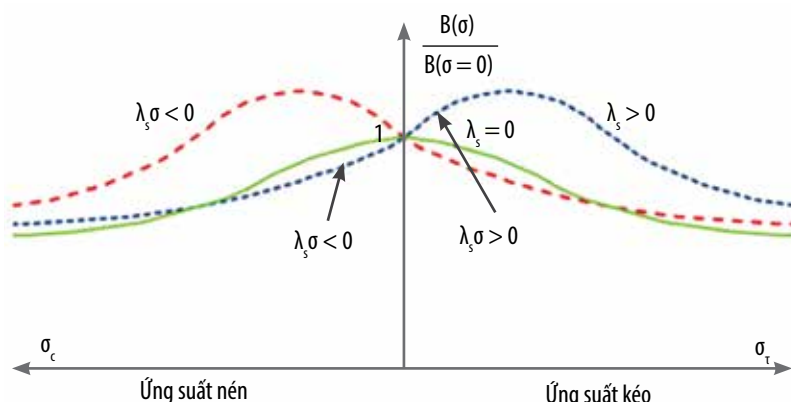
Từ giảo (magnetostriction) là hiện tượng vật liệu từ tính có thể thay đổi hình dạng khi chịu tác động của từ trường và ngược lại. Từ giảo thuận là hiện tượng vật liệu kim loại thay đổi chiều dài khi chịu tác động của từ trường, được phát hiện đầu tiên bởi James Joule năm 1842. Hiện tượng này được minh họa đơn giản như Hình 1 [3]. Khi vật liệu kim loại ở trạng thái không từ hóa hoặc ở trạng thái từ hóa thấp, các domain từ (magnetic domain) được định hướng ngẫu nhiên. Dưới tác dụng của từ trường, các domain từ được sắp xếp theo hướng của từ trường áp đặt cho đến khi bão hòa. Ở trạng thái bão hòa, các domain từ được căn chỉnh, sắp xếp song song với từ trường áp đặt, kéo theo sự thay đổi kích thước của vật liệu.

Ngược lại với hiệu ứng Joule là hiện tượng từ giảo ngược, hiệu ứng từ tính đàn hồi hay hiệu ứng Villari [1]. Khi vật liệu từ chịu tác động của ứng suất cơ học, dẫn đến sự thay đổi từ hóa và kéo theo sự thay đổi từ trường xung quanh vật liệu. Sự thay đổi độ cảm từ (B) trong vật liệu sắt từ dưới ảnh hưởng của ứng suất cơ học (σ) có dạng điển hình như Hình 2.

Đặc tính của thay đổi độ cảm từ của vật liệu theo ứng suất tác dụng phụ thuộc vào dấu của đại lượng $\lambda_s \sigma$, với λ_s là hệ số từ giảo bão hòa của vật liệu và đặc tính thay đổi này tuân theo nguyên lý Le Chatelier như phương trình (1):



Hình 1. Hiệu ứng từ giảo - Vật liệu thay đổi kích thước dưới tác dụng của từ trường [3]



Hình 2. Đặc trưng điển hình sự phụ thuộc giữa độ cảm từ (B) và ứng suất cơ học (σ) của vật liệu với hệ số từ tính bão hòa của vật liệu λ_s dương ($\lambda_s > 0$), âm ($\lambda_s < 0$) và bằng 0 ($\lambda_s = 0$) [3]

$$\left(\frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_H = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H} \right)_\sigma \quad (1)$$

Trong đó:

H: Từ trường ngoài;

λ : Hệ số từ giảo đặc trưng cho sự thay đổi hình dạng (chiều dài hoặc thể tích) của vật liệu sắt từ dưới tác dụng của từ trường ngoài.

Khi $\lambda_s \sigma$ dương, độ cảm từ tăng khi vật liệu chịu tác dụng của ứng lực và ngược lại khi $\lambda_s \sigma$ âm, độ cảm từ giảm khi vật liệu chịu tác dụng của ứng lực. Với quy ước ứng suất kéo (σ_t) có giá trị dương và ứng suất nén có giá trị âm, trong vật liệu có hệ số từ giảo bão hòa λ_s dương, mật độ từ thông B sẽ tăng đối với ứng suất kéo σ_t và quá trình tương tự sẽ xảy ra đối với vật liệu có hệ số từ giảo bão hòa λ_s âm khi chịu tác dụng của ứng suất nén σ_c . Hình 2 cho thấy tại 1 giá trị nhất định của ứng suất, xuất hiện giá trị cực đại của cảm ứng từ, tại đây $\left(\frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_H = 0$, được gọi là điểm đảo chiều Villari [4]. Sau khi đạt đến điểm này, vật liệu sẽ phản ứng với sự gia tăng thêm của ứng suất σ giống như vật liệu có dấu hiệu ngược lại của từ tính bão hòa λ_s (vật liệu có λ_s dương phản ứng giống như vật liệu có λ_s âm và ngược lại).

2.2. Kỹ thuật nhớ từ (MMM)

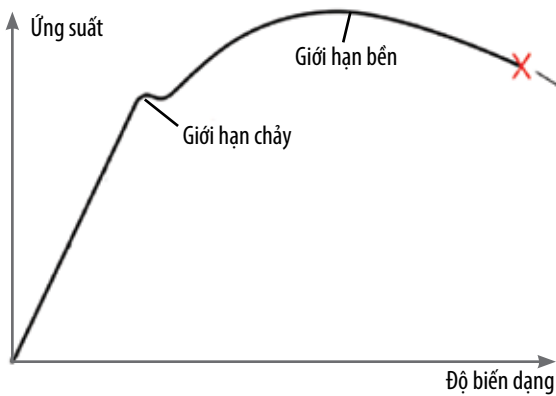
Các đường ống, thiết bị, kết cấu chịu lực chủ yếu đều được chế tạo bằng thép có từ tính, trong đó cấu trúc vi mô có thể được coi là tập hợp sắp xếp của các domain từ. Khi vật liệu thép chịu tác động của ngoại lực hoặc xuất hiện hư hỏng bên trong, dưới tác động của từ trường trái đất, các domain từ bên trong vật liệu được chuyển hướng không thuận nghịch dẫn đến tín hiệu từ trường bên ngoài xung quanh kim loại sẽ bị thay đổi và tín hiệu này được gọi là tín hiệu nhớ từ của kim loại (MMM) [5, 6]. Theo lý thuyết, có thể thiết lập tương quan giữa ứng suất nội của kim loại từ và tín hiệu nhớ từ trên bề mặt, qua đó sẽ xác định được ứng suất nội thực tế của kim loại [7] hoặc vị trí kim loại có ứng suất tập trung [6]. Lý thuyết này được

đề xuất bởi Dubov và sau đó phát triển thành một phương pháp chẩn đoán hư hỏng vật liệu có triển vọng. So sánh với các phương pháp từ hoặc thử nghiệm không phá hủy truyền thống, kỹ thuật nhớ từ có thể được sử dụng để dự báo và phát hiện sớm các khuyết tật và vị trí hư hỏng của vật liệu sắt từ mà không cần kích thích từ trường mạnh để từ hóa vật liệu và có thể sử dụng thiết bị thu thập tín hiệu nhớ từ đơn giản, chi phí không cao. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây hướng tới ứng dụng kỹ thuật nhớ từ sử dụng từ trường của trái đất làm nguồn kích thích - thay cho từ trường nhân tạo cần cường độ mạnh áp đặt bên ngoài - do đó tín hiệu còn được gọi là độ rò rỉ từ thông (self-magnetic flux leakage - SMFL) hay tín hiệu từ trường tự cảm. Sự biến đổi của tín hiệu SMFL liên quan đến nhiều yếu tố như từ trường ban đầu, cấu trúc vi mô, thành phần hóa học, hình dạng và kích thước của vật liệu sắt từ [8, 9].

3. Các kết quả nghiên cứu, ứng dụng nguyên lý Villari và kỹ thuật nhớ từ trong kiểm tra cấu trúc kim loại

3.1. Các nghiên cứu nước ngoài

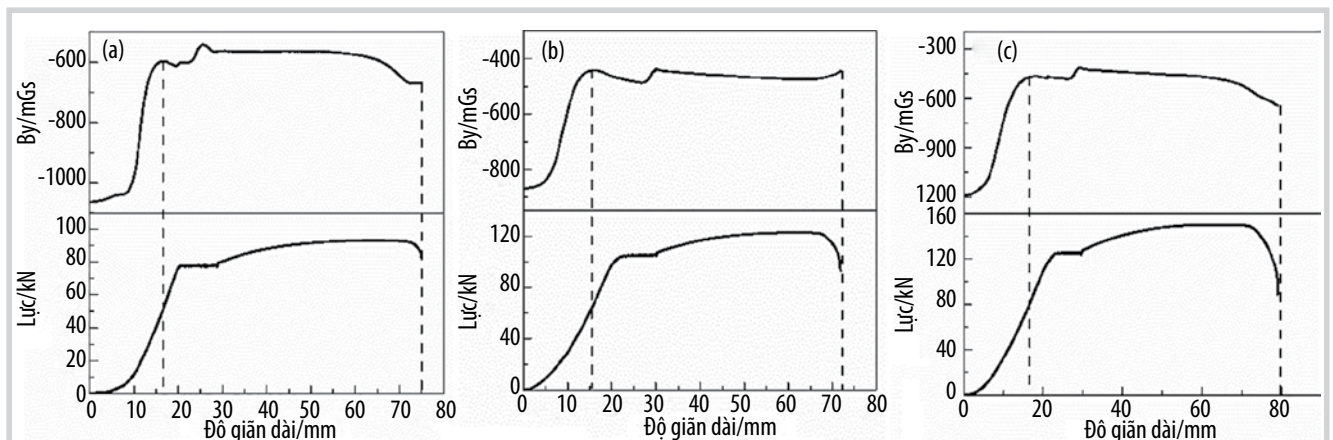
Để ứng dụng nguyên lý Villari cũng như kỹ thuật nhớ từ vào thực tế, rất nhiều nhà khoa học và công nghệ đã



Hình 3. Đặc trưng quan hệ giữa ứng suất - biến dạng của vật liệu [10]

tập trung nghiên cứu để tìm ra tương quan giữa SMFL và ứng suất tác động lên vật liệu từ cũng như mở rộng phạm vi và các đối tượng áp dụng nguyên lý này. Dưới tác động của lực sinh ra ứng suất, kim loại sẽ bị biến dạng và quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng của kim loại có dạng điển hình như mô tả trên Hình 3. Giai đoạn đầu tiên, độ biến dạng của kim loại tỷ lệ thuận với ứng suất kéo, được gọi là vùng biến dạng đàn hồi của vật liệu (elastic deformation). Tiếp đó, kim loại chuyển sang trạng thái biến dạng dẻo (plastic deformation), kim loại vẫn tiếp tục biến dạng nhưng ứng suất không tăng tương ứng với giới hạn chảy của vật liệu (yield strength). Giai đoạn cuối cùng sau khi chảy dẻo, khi ứng suất và biến dạng tiếp tục tăng cho đến khi kim loại bị thắt cổ chai và kéo đứt, giá trị ứng suất lớn nhất tương ứng với giới hạn bền của vật liệu (ultimate strength). Đối với thép rắn, không có giới hạn chảy rõ ràng, giới hạn chảy dẻo được xác định theo quy ước bằng giá trị ứng suất tương ứng với biến dạng dư tỷ đối là 0,2%.

Các khảo sát sự thay đổi của SMFL theo ứng suất cho thấy độ tự cảm từ biến thiên tương tự như tương quan giữa ứng suất và sự biến dạng của vật liệu. Nghiên cứu khảo sát sự thay đổi tín hiệu từ trường của các mẫu thép tròn ($\phi 12$ mm, $\phi 16$ mm và $\phi 18$ mm) theo độ biến dạng của mẫu do tác động của ứng suất kéo như mô tả trên Hình 4 [7]. Kết quả thu được cho thấy sự thay đổi tín hiệu từ tương tự như sự biến thiên của ứng suất theo độ biến dạng của vật liệu: giai đoạn đầu, tín hiệu cảm ứng từ của mẫu tăng cùng với sự tăng của độ biến dạng; khi ứng suất đạt khoảng 65% giá trị độ bền của vật liệu, từ trường vật liệu đạt tới trạng thái bão hòa và SMFL đạt tới điểm cực trị, gần như không thay đổi theo sự biến dạng của vật liệu cho đến khi mẫu bị phá hủy. Bằng cách lấy đạo hàm của tín hiệu độ cảm từ cho phép xác định vùng đàn hồi của vật liệu. Các nghiên cứu khác đã cho thấy khi tiến hành đo từ



Hình 4. Biến thiên tín hiệu từ theo độ giãn dài của mẫu trong quá trình tác động lực kéo sinh ra ứng suất trên mẫu thép # TSB. (a) $\phi 12$ mm, (b) $\phi 16$ mm và (c) $\phi 18$ mm [11]

trường tại cùng một điểm của mẫu sau khi bị phá hủy có sự khác biệt rất lớn so với trước khi bị phá hủy như trên Hình 5 với các điểm đo tương ứng như trên Hình 6 [11].

Khi đo độ tự cảm dọc theo mẫu thử nghiệm, tín hiệu từ trường tự cảm có xu hướng tăng gần như tuyến tính và tại mỗi điểm đo, các giá trị này gần như không đổi trong vùng biến dạng dẻo. Tại điểm mẫu bị phá hủy (tương ứng với ứng suất phá hủy), hình dạng đường cong độ tự cảm dọc theo vị trí mẫu khác so với mẫu trước khi bị phá hủy. Tại vị trí đứt mẫu, tín hiệu từ đổi chiều từ dương sang âm và có giá trị 0 tại biên điểm đứt mẫu.

Trong thực tế, để đảm bảo an toàn vận hành cho các công trình, đặc biệt đối với các cấu trúc chịu lực, thông thường vật liệu kim loại được thiết kế làm việc trong vùng đàn hồi. Nghiên cứu quy luật giữa SMFL - ứng suất trong vùng đàn hồi trên thép C45 cho thấy độ tự cảm từ tỷ lệ thuận với ứng suất kéo của mẫu thử nghiệm với hệ số góc ít phụ thuộc vào ứng suất cực đại như Hình 7 [9].

Các kết quả nghiên cứu cho thấy việc xây dựng tương quan SMFL - ứng suất đối với mẫu vật liệu là cơ sở cho phép xác định được ứng suất thực tế các cấu trúc chịu lực đang chịu tải.

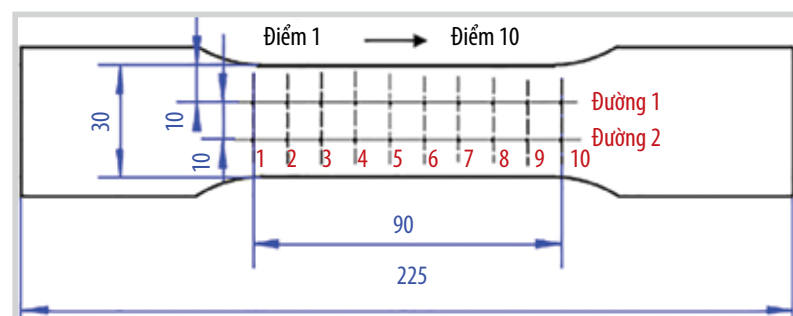
Ứng dụng hiệu ứng Villari nhằm phát hiện các vị trí có ứng suất tập trung, cho phép cảnh báo sớm các vị trí bất thường của đường ống, thiết bị là hướng nghiên cứu được quan tâm bởi nhiều nhà khoa học. D.L.Atherton đã phát triển kỹ thuật khảo sát đường ống bằng quy trình 2 bước nhằm thu nhận các tín hiệu rò rỉ từ thông từ các bất thường bên trong và bên ngoài đường ống chịu áp lực. Đường ống được từ hóa bằng cách phóng thoi từ (magnetic pig) nhờ áp lực của đường ống. Ứng suất

cục bộ bất thường bên trong đường ống thép do bị ăn mòn bên ngoài đường ống cũng có thể được thu nhận được như Hình 8 [12].

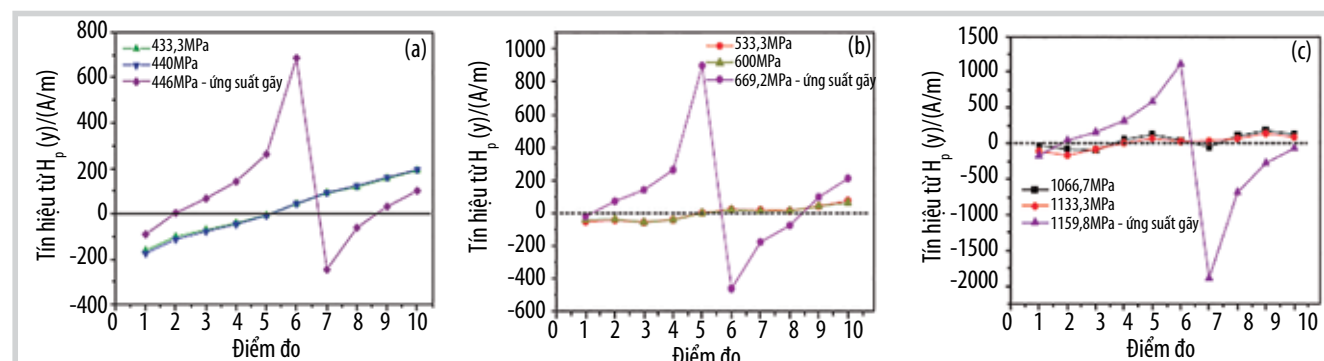
Khảo sát hiện trường trên cơ sở phân tích đánh giá sự biến thiên từ trường của đường ống bằng phần mềm cho phép chỉ ra các vùng tập trung ứng suất (stress concentration zone - SCZ), liên quan đến các vị trí khuyết tật của vật liệu [13]. Kết quả thu được khi sử dụng phóng thoi thông minh (ILI pigging) cho thấy sự tương đồng với dữ liệu khảo sát, ngoài ra còn có thể chỉ ra các vị trí bất thường tập trung ứng lực, cho phép cảnh báo sớm nguy cơ hư hỏng đường ống (Hình 9 và 10). Điều đó minh chứng khả năng ứng dụng thực tế của phương pháp và mở ra các nghiên cứu tiếp theo nhằm hoàn thiện công nghệ.

3.2. Nghiên cứu trong nước

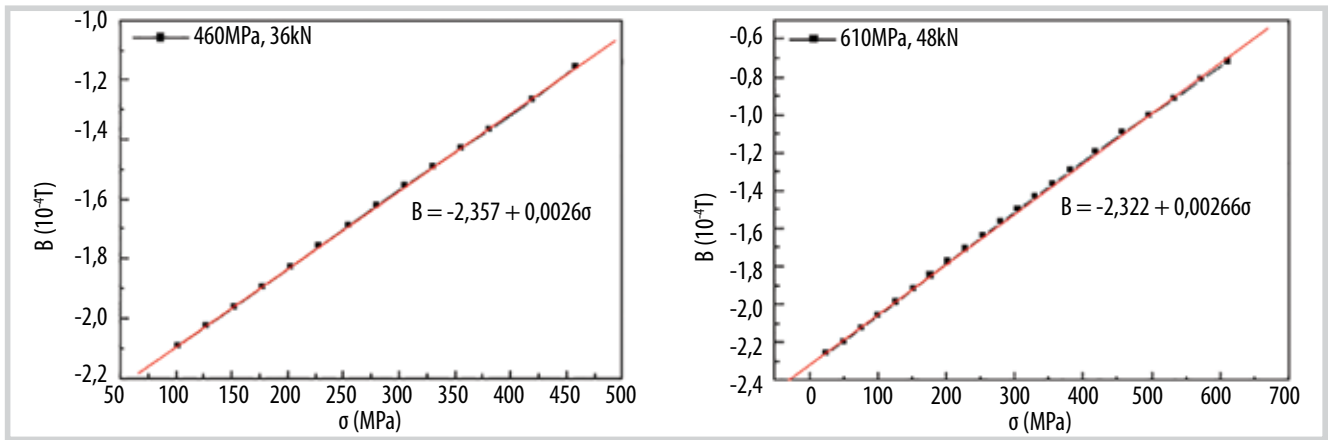
Ở trong nước, việc nghiên cứu ứng dụng các phương pháp từ nhằm dự đoán các vị trí khuyết tật, hư hỏng vật liệu kim loại còn rất hạn chế, chủ yếu áp dụng các kỹ thuật đã được thương mại hóa và gần như chưa có các công bố hoặc ứng dụng liên quan đến kỹ thuật nhớ từ và hiệu ứng Villari cho khảo sát, dự báo các hư hỏng, khuyết tật của các đường ống, thiết bị áp lực. Trên cơ sở các công bố quốc tế, Viện Dầu khí Việt Nam (VPI) đang nghiên cứu nhằm chế tạo thiết bị thu nhận tín hiệu từ trường trái đất xung quanh các công trình kim loại chịu tải với mục tiêu phát hiện sự thay đổi từ trường trái đất xung quanh các vị trí vật liệu kim loại tập trung ứng suất và dự báo sớm hư hỏng vật liệu chịu áp.



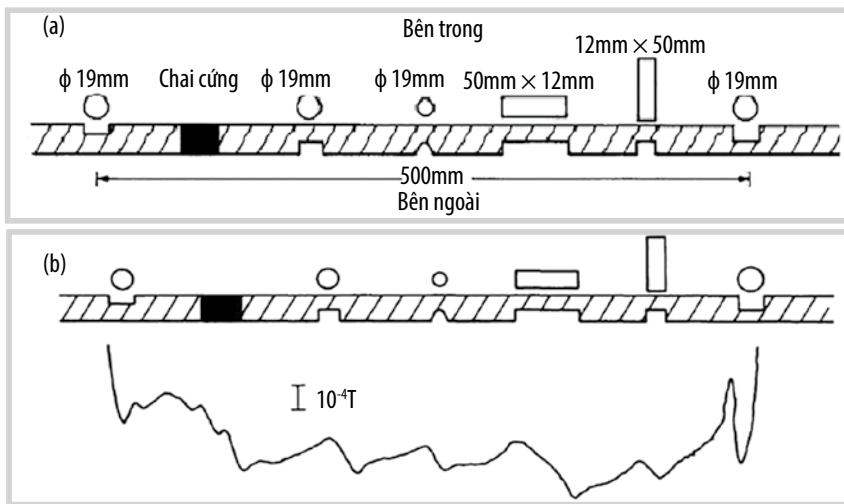
Hình 5. Hình dạng mẫu thử nghiệm và các vị trí thử nghiệm [11]



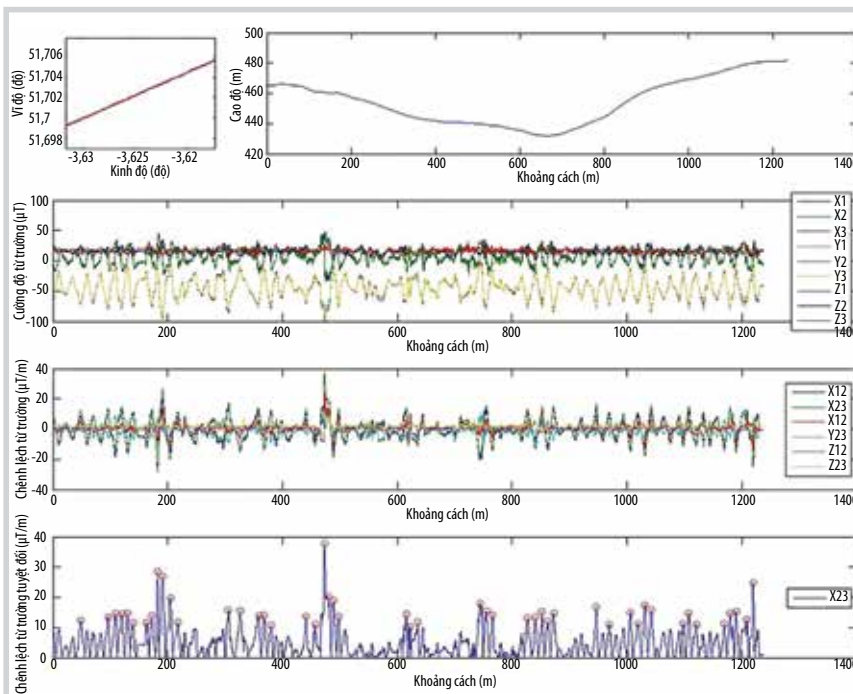
Hình 6. Sự phân bố tín hiệu từ trường trước và sau khi bị phá hủy tương ứng với 3 loại thép thử nghiệm khác nhau (thép Q233 (a), thép 0,45% C (b) và thép 45CrNiMoVA (c)) [11]



Hình 7. Biến thiên SMFL theo ứng suất kéo của mẫu [9]



Hình 8. (a) Đường ống được chế tạo bất thường trong thử nghiệm của Atherton (b) Từ trường thu được dọc theo đường ống áp suất 180 MPa đã được từ hóa [12]



Hình 9. Đặc trưng kết quả khảo sát hiện trường [13]

3.2.1. Điều kiện thực nghiệm

Thiết bị đo từ trường được lắp ráp các đầu dò cảm biến 3 chiều có khả năng đo từ trường trái đất, được tích hợp bộ khuếch đại tín hiệu có khử nhiễu ở tần số điện lưới 50 - 60 Hz. Kết quả khảo sát được thu nhận và xử lý bằng phần mềm; dữ liệu đo được lưu lại trong máy tính, có thể chuyển sang dạng excel để phân tích, xử lý và vẽ đồ thị.

Thiết bị chế tạo được thử nghiệm đo từ trường trái đất gần mẫu thép chịu tác động của ứng suất kéo. Các mẫu thử nghiệm được chế tạo từ thép carbon thấp, có hình dạng tương tự mẫu thử nghiệm kéo, được gá trên thiết bị kéo cơ học có khả năng điều chỉnh tốc độ rất chậm. Đầu đo từ trường được bố trí gần mẫu thép và có thể di chuyển dọc theo mẫu thử nghiệm.

3.2.2. Kết quả thu được

Khảo sát sự biến thiên của từ trường gần mẫu thép khi bị kéo giãn tại vị trí cố định không có khuyết tật trên 2 mẫu có và không có khuyết tật (Hình 11). Kết quả thu được cho thấy sự biến thiên tín hiệu từ trường theo độ giãn dài của mẫu có tương quan tương tự như quan hệ giữa ứng suất và độ giãn dài của vật liệu đã được mô tả trong các thử nghiệm của Dong Lihong và các cộng sự [11].

Dưới tác dụng của lực kéo, các domain từ trong mẫu kim loại chuyển từ trạng thái sắp xếp ngẫu nhiên sang trạng thái sắp xếp có trật tự nhằm đáp ứng sự giãn dài của mẫu, tương ứng với trạng thái kim loại trong vùng đàn hồi. Trong vùng này sự biến đổi từ trường tự cảm tăng dần theo độ giãn dài của mẫu. Khi các domain từ đạt trạng thái bão hòa, từ trường gần như không thay đổi mặc dù mẫu vẫn được kéo dài cho đến khi bị phá hủy.

Tại các ứng suất kéo không đổi, từ trường được đo tại các vị trí cố định dọc theo chiều dài của mẫu thử nghiệm đối với mẫu không có khuyết tật và mẫu có khuyết tật với vị trí khuyết tật được tạo tại chính giữa mẫu thử nghiệm (tương ứng với vị trí 0). Kết quả thu được như Hình 12.

Trên mẫu có và không có khuyết tật nhân tạo, từ trường được xác định dọc theo chiều dài của mẫu thử nghiệm tại ứng suất kéo tương ứng 50, 100 và 150 MPa cho thấy rõ sự khác biệt tại vị trí có và không có khuyết tật như Hình 12.

Kết quả thu được cho thấy thiết bị chế tạo có khả năng thu nhận các tín hiệu từ trường cảm ứng xung quanh kim loại từ chịu ứng lực, có thể phát hiện sự bất thường tại các

vị trí tập trung ứng lực như các khuyết tật, mất kim loại do ăn mòn...

4. Kết luận

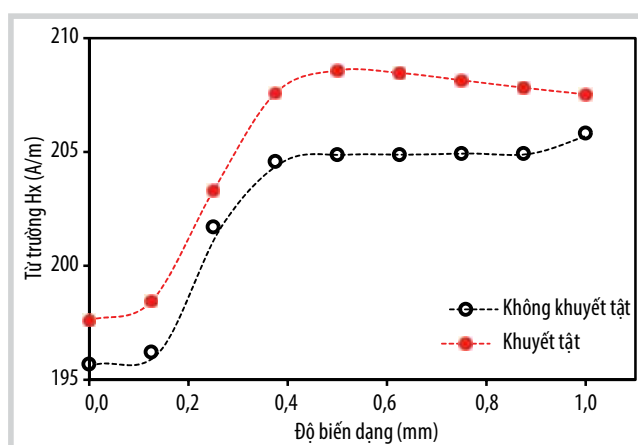
Kỹ thuật nhớ từ được phát triển trên cơ sở nguyên lý Villari là kỹ thuật mới được các nhà khoa học và công nghệ trong và ngoài nước quan tâm nghiên cứu, phát triển và ứng dụng như 1 phương pháp NDT tiên tiến, cho phép phát hiện sớm các hư hỏng tiềm ẩn tại các vị trí tập trung ứng suất. Các nghiên cứu bước đầu tại Viện Dầu khí Việt Nam đã cho phép chế tạo thiết bị có khả năng thu nhận các tín hiệu cũng như sự biến đổi từ trường xung quanh kim loại và có thể phát hiện các bất thường của các mẫu thử nghiệm kéo, cho phép mở ra hướng nghiên cứu ứng dụng thực tiễn trong công nghiệp, đặc biệt đối với các thiết bị đường ống chịu áp lực khó tiếp cận trực tiếp.

Tài liệu tham khảo

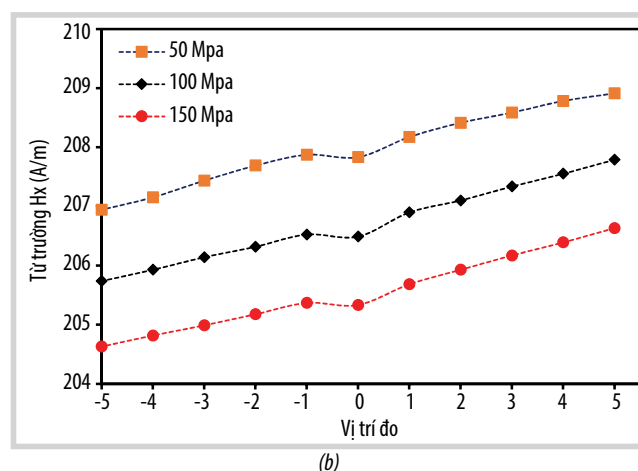
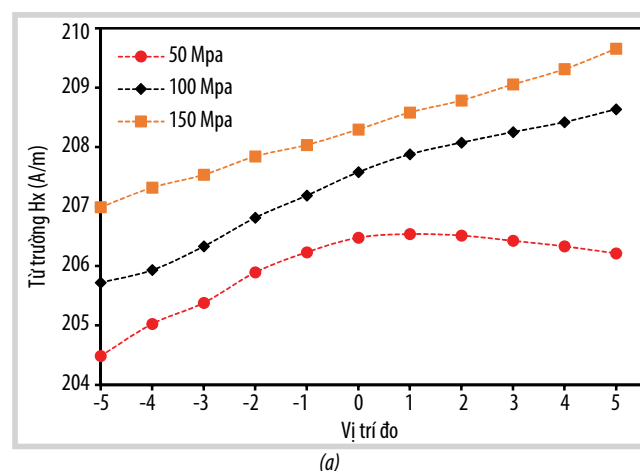
- [1] E.Villari, "Change of magnetization by tension and by electric current", *Annals of Physics and Chemistry*, Vol. 126, pp. 87 - 122, 1865.



Hình 10. Đặc trưng kết quả khảo sát hiện trường so sánh giữa MMM và ILI (đường đỏ) [13]



Hình 11. Biến thiên SMFL theo độ giãn dài của mẫu thử nghiệm



Hình 12. Sự biến thiên từ trường dọc theo chiều dài của mẫu thử nghiệm không có khuyết tật (a) và có khuyết tật tại vị trí 0 (b)

- [2] A.A.Dubov, "A study of metal properties using the method of magnetic memory", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 39, pp. 401 - 405, 1997.
- [3] Peter Švec Sr., Roman Szewczyk, Jacek Salach, Dorota Jackiewicz, Peter Švec, Adam Bieńkowski, and Jozef Hoško, "Magnetoelastic properties of selected amorphous systems tailored by thermomagnetic treatment", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 65, No. 4, pp. 259 - 261, 2014. DOI: 10.2478/jee-2014-0040.
- [4] Dorota Jackiewicz, Maciej Kachniarz, and Adam Bieńkowski, "Investigation of the magnetoelastic Villari effect in steel truss", *Recent Global Research and Education: Technological Challenges*. Springer International Publishing, 2017, pp. 63 - 70.
- [5] D.C.Jiles, "Theory of magnetomechanical effect", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 28, No. 8, pp. 1537 - 1546, 1995.
- [6] Anatoly A. Dubov and Sergey Kolokolnikov, "Technical diagnostics of equipment and constructions with residual life assessment using the method of metal magnetic memory", *17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25 - 28 October, 2008*.
- [7] Caoyuan Pang, Jianting Zhou, Ruiqiang Zhao, Hu Ma, and Yi Zhou, "Research on internal force detection method of steel bar in plastic and yielding stage based on metal magnetic memory", *Materials*, Vol. 12, No. 7, pp. 1167, 2019. DOI: 10.3390/ma12071167.
- [8] Guo Pengju, Chen Xuedong, Guan Weihe, Cheng Huayun, and Jiang Heng, "Effect of tensile stress on the variation of magnetic field of low-alloy steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 20, pp. 2474 - 2477, 2011. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.05.015.
- [9] Shangkun Ren and Xianzhi Ren, "Studies on law of stress-magnetization based on magnetic memory testing technique", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 449, pp. 165 - 171, 2018. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.09.050.
- [10] ASM International, Atlas of Stress – Strain Curves, 2nd edition. *The Materials Information Society*, 2002.
- [11] Dong Lihong, Xu Binshia, Dong Shiyuna, Chen Qunzhic, and Wang Dan, "Variation of stress-induced magnetic signals during tensile testing of ferromagnetic steels", *NDT&E International*, Vol. 41, No. 3, pp. 184 - 189, 2008. DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.10.003.
- [12] D.L.Atherton, "Stress-shadow magnetic inspection technique for far-side anomalies in steel pipe", *NDT International*, Vol. 16, No. 3, pp. 145 - 149, 1983. DOI: 10.1016/0308-9126(83)90037-8.
- [13] Stephen G.H.Staples, "Using magnetostriction and the villari effect to detect anomalies", *PhD Transfer Report*, 2012.

VILLARI EFFECT AND METAL MAGNETIC MEMORY TECHNIQUE IN INSPECTION OF MAGNETIC MATERIALS UNDER STRESS

Nguyen Thi Le Hien, Doan Thanh Dat, Le Thi Phuong Nhung

Vietnam Petroleum Institute

Email: hienntl@vpi.pvn.vn

Summary

Stress concentration is a major cause of metal structure failures. In ferromagnetic materials, it changes the nearby magnetic field, which is called the inverse magnetostrictive effect or Villari effect. The metal magnetic memory (MMM) method, which is developed based on the Villari effect, is considered a novel, advanced, unique non-destructive testing technique allowing identification of stress concentration zones and early prediction of damage potential for ferromagnetic materials. The paper introduces the Villari effect theoretical basis, the development of the MMM technique, and some experimental investigations conducted by the Vietnam Petroleum Institute in which this technique is used to produce test equipment for material structures under stress.

Key words: Villari effect, metal magnetic memory, non-destructive testing, stress concentration, structure failure.