

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO THIẾT BỊ PHÁT HIỆN CÁC VỊ TRÍ TẬP TRUNG ỨNG SUẤT TRÊN VẬT LIỆU SẮT TỪ DỰA TRÊN NGUYÊN LÝ TỪ TRƯỜNG VILLARI

Nguyễn Thị Lê Hiền, Đoàn Thành Đạt

Viện Dầu khí Việt Nam

Email: hienntl@vpi.pvn.vn

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.01-05>

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo thiết bị đánh giá tính toàn vẹn của các công trình chịu ứng lực như đường ống, thiết bị chịu áp bằng cách xác định vùng tập trung ứng suất. Thiết bị sử dụng cảm biến từ trường 3 trục để đo các thành phần từ trường theo 3 hướng Ox, Oy và Oz trong khoảng từ trường làm việc từ -300 μ T đến 300 μ T. Kết quả khảo sát từ thông bằng thiết bị này trên các mẫu thép API 5L dưới tác dụng của ứng suất kéo cho thấy sự biến đổi lớn về từ trường tại độ giãn dài của mẫu thép nhỏ hơn 1 mm (tương đương với độ giãn dài tương đối 0,5%, ứng với trạng thái biến dạng đàn hồi của vật liệu). Trong trường hợp có khuyết tật nhân tạo, thiết bị này có thể phát hiện sự thay đổi từ trường do sự tập trung ứng suất tại vị trí khuyết tật.

Từ khóa: Thiết bị đo từ trường, vùng tập trung ứng suất, đánh giá tính toàn vẹn, phát hiện khuyết tật, từ trường rò.

1. Mở đầu

Hiện nay, kiểm tra không phá hủy (NDT) là kỹ thuật được sử dụng rộng rãi trong quá trình đánh giá độ toàn vẹn của các thiết bị, đường ống công nghiệp đang hoạt động. Kiểm tra không phá hủy có thể phát hiện các hư hại, khuyết tật của vật liệu, kết cấu, chi tiết hoặc xác định đặc trưng của đối tượng kiểm tra mà không làm ảnh hưởng đến khả năng sử dụng của đối tượng kiểm tra [1]. Kiểm tra không phá hủy gồm rất nhiều phương pháp khác nhau và thường được chia thành 2 nhóm chính theo khả năng phát hiện khuyết tật:

- Các phương pháp có khả năng phát hiện các khuyết tật nằm sâu bên trong (và trên bề mặt) của đối tượng kiểm tra: phương pháp chụp ảnh phóng xạ (Radiographic Testing - RT) và phương pháp kiểm tra siêu âm (Ultrasonic Testing - UT).
- Các phương pháp có khả năng phát hiện các khuyết tật bề mặt (và gần bề mặt): phương pháp kiểm tra thẩm thấu chất lỏng (Liquid Penetrant Testing - PT); phương pháp kiểm

tra bột từ (Magnetic Particle Testing - MT); phương pháp kiểm tra dòng xoáy (Eddy Current Testing - ET)...

Ưu điểm của các phương pháp này là có thể kiểm tra khuyết tật kim loại mà không cần dừng vận hành, song yêu cầu phải tiếp xúc trực tiếp với bề mặt đường ống thiết bị. Do đó việc áp dụng các phương pháp trên gặp khó khăn đối với các cấu kiện kim loại ở các vị trí khó tiếp cận, ví dụ như đường ống chôn ngầm; đường ống, thiết bị có bọc bảo ôn... Chính vì vậy, thử nghiệm và triển khai các phương pháp kiểm tra không tiếp xúc là cấp thiết nhằm đáp ứng nhu cầu thực tế. Từ trường là một trong các nguyên lý kiểm tra không tiếp xúc được nghiên cứu và có khả năng ứng dụng rộng rãi.

Từ giảo thuận (từ giảo Joule) là tính chất của vật liệu từ có thể thay đổi hình dạng và kích thước khi chịu tác động của từ trường ngoài [2]. Cấu trúc của vật liệu từ có thể coi là tập hợp của nhiều nam châm vĩnh cửu nhỏ, được gọi là các miền từ (domains). Các miền từ này bao gồm nhiều nguyên tử và được sắp xếp ngẫu nhiên khi chưa bị từ hóa. Khi vật liệu bị từ hóa dưới tác động của từ trường ngoài, các miền từ dịch chuyển và quay theo chiều của từ trường ngoài áp đặt, dẫn đến thay đổi kích thước của vật liệu (Hình 1).

Hiệu ứng từ giảo nghịch, hay còn gọi là hiệu ứng từ



Ngày nhận bài: 15/10/2020. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 15/10 - 11/11/2020.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/12/2020.

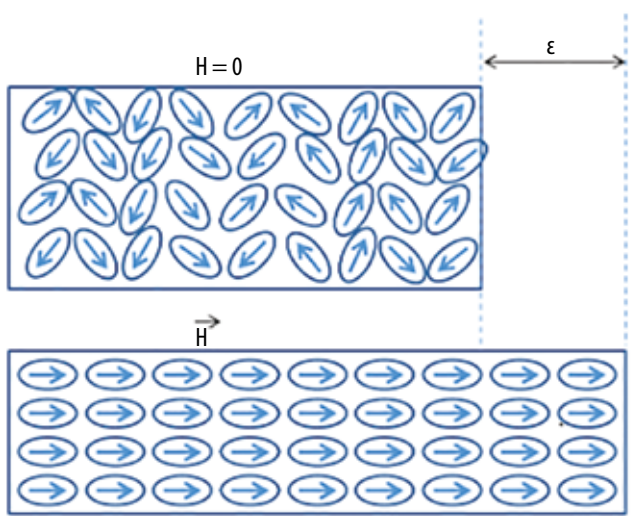
đàn hồi hoặc hiệu ứng Villari đặc trưng cho sự thay đổi độ cảm từ của vật liệu khi chịu tác động của ứng suất cơ học [3].

Đường ống và thiết bị áp lực thường dễ bị ăn mòn bên trong hoặc bên ngoài, có thể làm suy yếu tính toàn vẹn của cấu trúc. Áp lực hoặc ứng suất tác động lên các vị trí bất thường (khuyết tật, ăn mòn...) dẫn đến sự tập trung ứng suất so với các vị trí không có bất thường. Việc đo vùng tập trung ứng suất (Stress Concentration Zone - SCZ), cũng như phát hiện sự phát triển của khuyết tật có ý nghĩa lớn trong dự đoán vị trí hư hỏng cơ học và đánh giá tuổi thọ của đường ống, thiết bị [4].

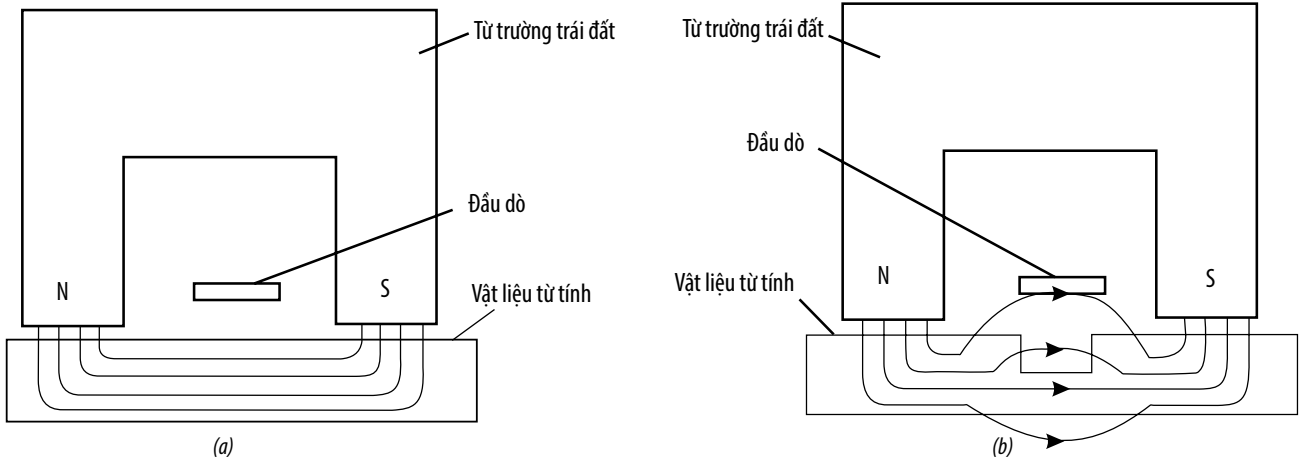
Kỹ thuật nhớ từ (Metal Magnetic Memory - MMM) được phát triển đầu tiên ở Nga năm 1997 [5], dựa trên hiệu ứng giao từ Villari [6, 7], mà ở đó ứng suất tác dụng lên vật liệu sắt từ gây ra sự sắp xếp lại các miền từ. Khi chịu tác động của từ trường ngoài như từ trường trái đất, từ trường tự cảm do vật liệu tạo ra sẽ gây sự thay đổi từ trường xung quanh vật liệu (Hình 2). Bằng cách đo phân bố từ trường trên bề mặt vật liệu cho phép phát hiện các vị trí bất thường của vật liệu từ và phương pháp nhớ từ được dùng như công cụ kiểm tra định tính định kỳ để đánh giá mức độ của ứng suất tập trung trong vật liệu [8, 9]. Theo đó, khi một khối vật liệu có từ tính (sắt, thép) chịu tác dụng của ứng suất, đặt trong từ trường của trái đất, nếu vật liệu không thay đổi về hình dáng kích thước (không có khuyết tật), từ thông phát ra từ vật liệu sẽ ổn định. Trong trường hợp vật liệu có sự thay đổi về hình dạng và kích thước hoặc khuyết tật trên vật liệu, dẫn đến ứng suất tập trung tại các điểm thay đổi đó và làm biến đổi từ thông theo các mức độ khác nhau phụ thuộc vào ứng suất mà các điểm đó đang chịu, gây nên hiện tượng từ giao ngược hay còn

gọi là hiệu ứng Villari. Hiệu ứng này vẫn tồn tại một thời gian kể cả sau khi ứng suất không còn nữa. Khảo sát mức biến thiên từ thông trên toàn bộ khối vật liệu bằng thiết bị đo từ trường cho phép phát hiện từ trường bất thường tại các vị trí có ứng suất tập trung, từ đó, xác định chính xác các vị trí/khu vực xuất hiện khuyết tật. Mặc dù không định lượng được mức độ hư hỏng, việc tầm soát và phát hiện sớm các bất thường giúp phòng ngừa sự cố cho thiết bị đường ống [10 - 13]. Kỹ thuật MMM tương đối giống với kỹ thuật kiểm tra từ trường rò (Magnetic Flux Leakage Testing - MFL), cả 2 phương pháp đều đo từ trường xung quanh cấu kiện sắt từ, tuy nhiên có sự khác biệt khá lớn. Kỹ thuật kiểm tra từ trường rò yêu cầu phải đặt từ trường ngoài có cường độ lớn lên vật cần kiểm tra và được áp dụng chủ yếu để kiểm tra các khuyết tật hình học; trong khi kỹ thuật MMM chỉ dùng địa từ trường yếu (từ trường trái đất) và hiệu ứng rất nhạy với ứng suất. Thông thường trong thực tế, có thể có cả khuyết tật hình học và vùng tập trung ứng suất cục bộ trong các cấu trúc sắt từ; trong đó tín hiệu do khuyết tật hình học gây nhiều từ trường rò và tín hiệu do tập trung ứng suất gây ra dị hướng cục bộ [10]. Ưu điểm nổi bật của kỹ thuật MMM là có thể phát hiện vùng tập trung ứng suất (SCZ). Các khu vực ứng suất cao thường là các vị trí nhạy cảm, dễ hư hỏng. Do đó, MMM là phương pháp có khả năng dự đoán các khu vực đang phát triển dị thường trước khi vật liệu bị phá hủy, có thể phát hiện ứng suất tập trung, phân tích tất cả các khu vực chịu ứng suất cao, bao gồm dị thường, ăn mòn và ứng suất uốn, làm cho phương pháp toàn diện hơn các công nghệ hiện có. Tuy nhiên, sự biến thiên từ trường do ứng suất tập trung gây ra thường nhỏ, theo bậc 10 μT , trên sự biến thiên trong trường nền (trái đất) trong khoảng 40 - 60 μT . Do đó, việc chế tạo thiết bị đo từ trường trong khoảng này gặp nhiều khó khăn [4]. Sự ra đời của các dụng cụ đo từ trường nhỏ, gọn có thể cầm tay gần đây đã giúp cho việc đo đạc và giải thích các tín hiệu từ trường thu được trở nên khả thi.

Trên thế giới đã có các nghiên cứu về ứng dụng này, trong đó nổi bật là các sản phẩm phần mềm mô phỏng và các đầu dò phát hiện khuyết tật kim loại. Các công bố chỉ dừng ở sản phẩm nghiên cứu và đăng ký bản quyền, rất ít sản phẩm được thương mại hóa. Một số sản phẩm thương mại đã được bán trên thị trường như Magnetostrictive Linear Position Sensor - MTS (Mỹ), Magnetostrictive Sensor - SwRI (Mỹ). Đặc biệt, các sản phẩm thiết bị hoàn chỉnh phục vụ cho quá trình phát hiện khuyết tật đường ống, thiết bị trên cơ sở nguyên lý từ giao nghịch vẫn chưa được phát triển trên thị trường.



Hình 1. Hiệu ứng từ giao - Từ trường đều áp đặt gây ra sự thay đổi kích thước của mẫu vật liệu từ



Hình 2. Hình ảnh từ thông của vật liệu từ tính trong từ trường đều (a) khi không xuất hiện khuyết tật và (b) khi xuất hiện khuyết tật



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý ứng dụng hiệu ứng Villari trong phát hiện khuyết tật vật liệu từ

Ở Việt Nam, việc sử dụng nguyên lý từ giao nghịch hiện nay còn rất hạn chế [15]. Do đó việc nghiên cứu nhằm thiết kế, chế tạo thiết bị có thể đo sự rò rỉ từ trường “tự nhiên” (SMLF) từ các vị trí bất thường - ứng suất tập trung mà không yêu cầu áp đặt từ trường bên ngoài (trên cơ sở nguyên lý Villari) cho phép cảnh báo sớm khuyết tật có ý nghĩa ứng dụng thực tế. Bài báo giới thiệu thiết bị đo từ trường được chế tạo bởi Viện Dầu khí Việt Nam (VPI) và các kết quả thử nghiệm ban đầu về phát hiện ứng suất tập trung trên các mẫu thép dưới tác động của ứng suất.

2. Thiết kế, chế tạo thiết bị thu nhận tín hiệu từ trường

2.1. Cấu tạo thiết bị

Bản mạch chính được kết nối từ 4 phần riêng biệt là khối cảm biến, khối khuếch đại vào lọc nhiễu, khối chuyển đổi tương tự - số và khối hiển thị, giao tiếp trên máy tính.

Khối cảm biến gồm nguồn nuôi và cảm biến. Nguồn nuôi cung cấp nguồn dòng điện hoặc điện áp cho cảm biến đồng thời cung cấp nguồn cho các linh kiện trong mạch khuếch đại, bộ chuyển đổi tương tự - số và các mạch hiển thị. Cảm biến được lựa chọn là cảm biến 3 chiều của Honeywell với độ nhạy cao, cảm biến từ trường hoạt động theo nguyên lý từ trường khổng lồ - GMR. Đây là loại cảm biến lai gồm 1 cảm biến 2 trục và 1 cảm biến 1 trục với khoảng đo ±2 Gs.

Khối khuếch đại vào lọc nhiễu là bộ phận sử dụng các mạch để lọc các nhiễu từ môi trường. Trong nghiên

cứu chế tạo thiết bị này, khối 3 tầng khuếch đại đã được sử dụng.

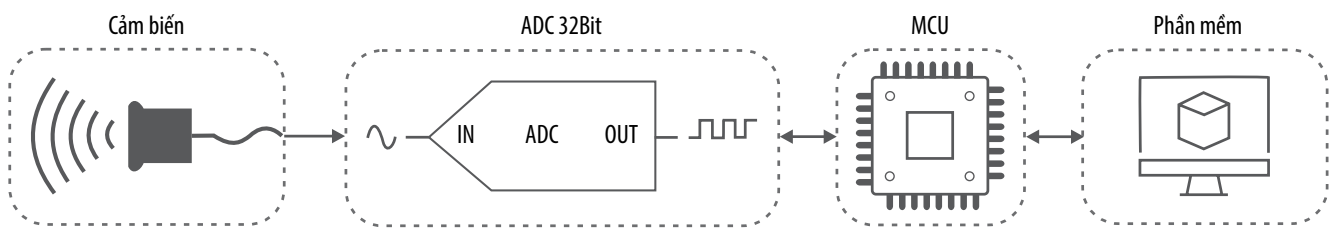
Khối chuyển đổi tương tự - số (ADC): Mạch chuyển đổi tương tự sang số (chuyển đổi tín hiệu analog sang tín hiệu digital) là linh kiện bán dẫn thực hiện chuyển đổi đại lượng vật lý tương tự liên tục được thu nhận từ cảm biến sang giá trị số nhằm biểu diễn độ lớn của đại lượng đó. Cảm biến từ có khả năng thu nhận tín hiệu từ thông qua tín hiệu đầu ra là điện áp. Bộ chuyển đổi tương tự sang số IC ADS1262 có độ phân giải rất cao và bộ khuếch đại có thể lập trình và khả năng kháng nhiễu tốt.

Khối hiển thị, giao tiếp máy tính là bộ phận giúp quan sát trực tiếp các tín hiệu trên màn hình máy tính, đồng thời cho phép lưu trữ các giá trị đo được trong máy tính hoặc trong các thẻ nhớ.

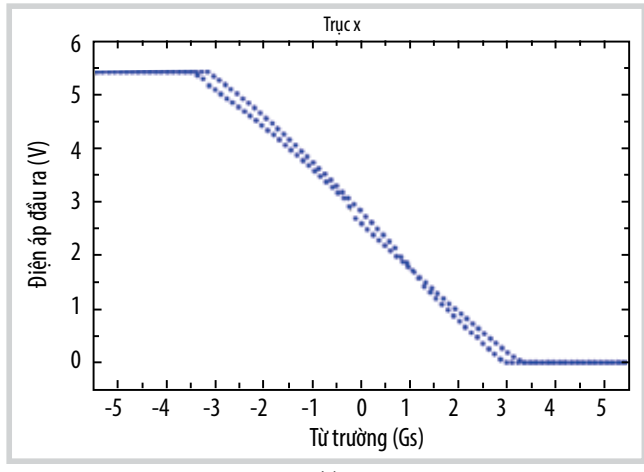
2.2. Khảo sát đặc trưng của cảm biến từ

Cảm biến từ của Honeywell được sử dụng là đầu dò từ trường dạng tuyến tính. Đầu ra của cảm biến là tín hiệu điện áp, tỷ lệ thuận với từ trường áp đặt vuông góc với bề mặt trên của cảm biến. Để kiểm tra đặc tính của cảm biến trước khi chế tạo thiết bị, tương quan giữa điện áp đầu ra của cảm biến với sự thay đổi từ trường ngoài đã được khảo sát.

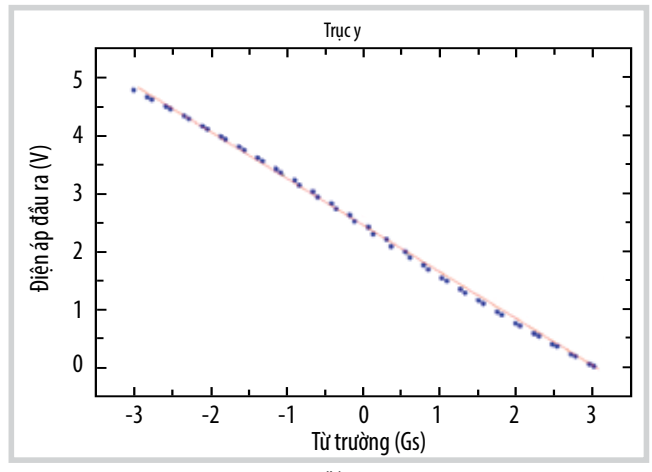
Từ trường ngoài áp đặt là từ trường đều, được tạo ra bởi các cuộn dây (từ trường Helmholtz); ở đó, cường độ từ trường tạo ra trong các cuộn dây được điều khiển bằng



Hình 4. Sơ đồ ghép nối bản mạch



(a)



(b)

Hình 5. Quan hệ giữa tín hiệu đầu ra của cảm biến và từ trường ngoài áp đặt theo 2 phương trục x (a) và trục y (b)



Hình 6. Hình dạng và các điểm đo của mẫu (a) và khuyết tật nhân tạo trên mẫu (b)

dòng điện một chiều không đổi đi qua. Tín hiệu đầu ra của cảm biến được lấy thông qua von kế có độ chính xác cao, được kết nối máy tính. Tương quan giữa tín hiệu đầu ra của cảm biến theo từ trường ngoài áp đặt được mô tả trên Hình 5.

Kết quả thu được cho thấy sự biến thiên điện thế đầu ra của cảm biến theo từ trường áp đặt là tỷ lệ thuận trong vùng từ trường -3 Gs đến 3 Gs (tương ứng với từ trường từ -300 μ T đến 300 μ T). Ngoài vùng từ trường này cảm biến đạt trạng thái bão hòa. Cảm biến được lựa chọn là phù hợp để đo từ trường rò sinh ra trên từ trường tự nhiên của trái đất.

Với các đặc tính của cảm biến và cấu hình của thiết bị đã được thiết kế, các bản mạch in được lắp đặt linh kiện tạo thiết bị mẫu để đánh giá các đặc tính từ của các mẫu kim loại từ chịu tác động của ứng suất trong trường hợp có và không có khuyết tật.

3. Thử nghiệm đo từ trường trên mẫu thép chịu ứng suất

3.1. Chuẩn bị mẫu

Các mẫu thép thử nghiệm được chế tạo từ thép API 5L, vật liệu được sử dụng rộng rãi trong chế tạo các đường ống vận chuyển dầu khí. Mẫu thử nghiệm dạng phẳng, hình chày, kích thước đoạn giãn dài khảo sát là $190 \times 10 \times 2$ mm (Hình 6). Độ nhám bề mặt Ra là 1,6 mm. Hai đầu được đục lỗ để có thể lắp vào thiết bị thử nghiệm kéo.

Mẫu được đánh dấu các điểm đo, mỗi điểm cách đều nhau 10 mm. Khuyết tật được tạo chính giữa mẫu để tạo ứng suất tập trung khi mẫu được thử nghiệm kéo. Để tránh ứng suất dư ảnh hưởng đến các kết quả đo từ trường sau này, các khuyết tật được tạo thành bằng phương pháp ăn mòn điện hóa, sử dụng dòng điện anode một chiều không đổi áp đặt lên trên mẫu. Hình dạng, kích thước và độ sâu khuyết tật được khống chế bằng diện tích phần mẫu tiếp xúc với dung dịch điện ly và điện lượng đi qua mẫu.

3.2. Ứng suất kéo

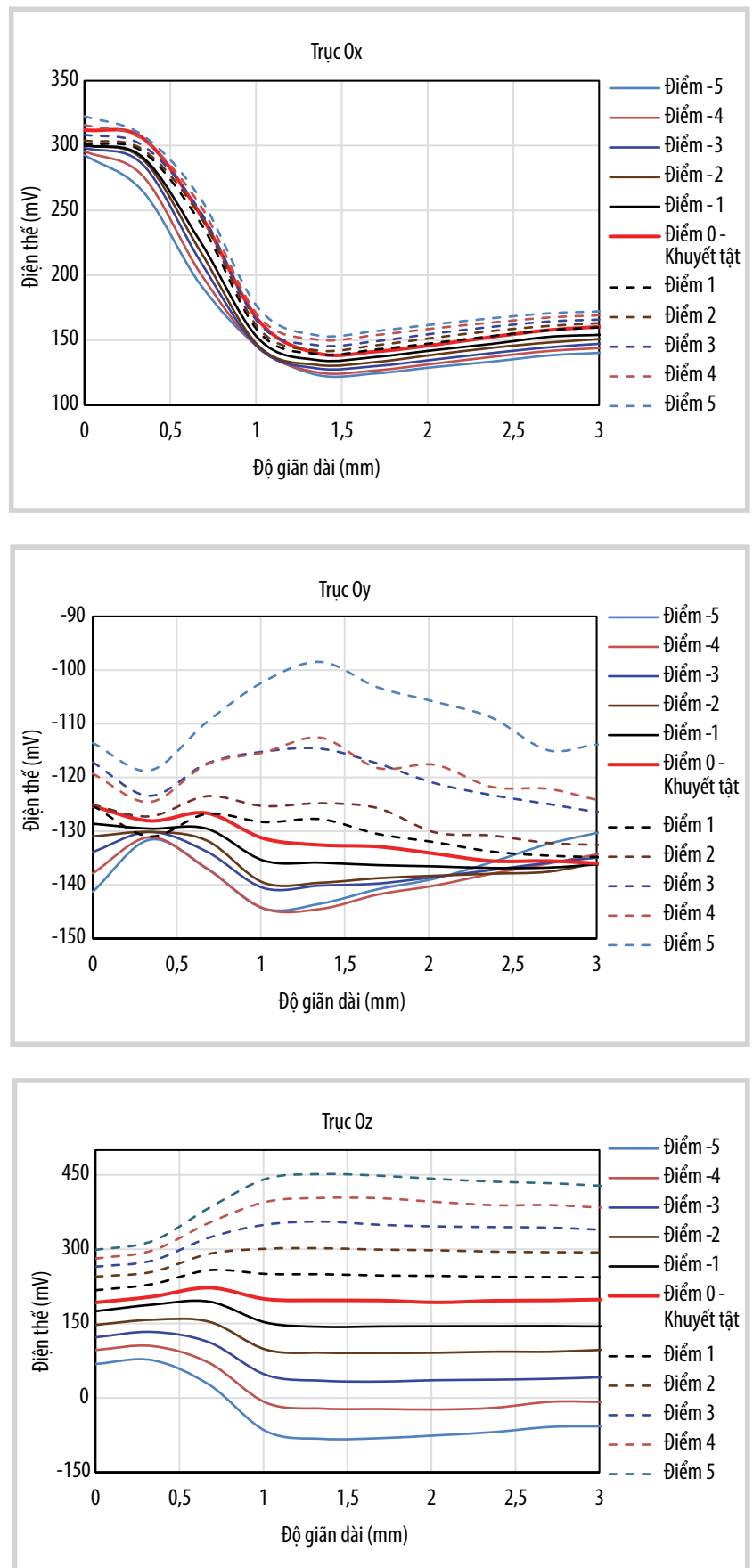
Để kiểm tra khả năng phát hiện ứng suất tập trung của thiết bị tự chế tạo bằng hiệu ứng từ trường đàn hồi, mẫu thép được lắp trên thiết bị thử nghiệm kéo dạng cơ học DLR để tạo ứng suất kéo. Trong quá trình kéo, mỗi mẫu thử được định vị thẳng đứng giữa các giá đỡ trên và dưới của máy thử nghiệm. Ứng suất kéo được áp đặt lên mẫu thử thông qua độ giãn dài của mẫu. Các giá trị từ trường của các điểm trên mỗi đường đo được thu thập tại một độ giãn dài xác định trước. Sau mỗi phép đo, mẫu lại được kéo giãn tương ứng với độ giãn dài cao hơn và quy trình trên được lặp lại cho đến khi mẫu bị đứt gãy.

3.3. Thử nghiệm đo từ trường

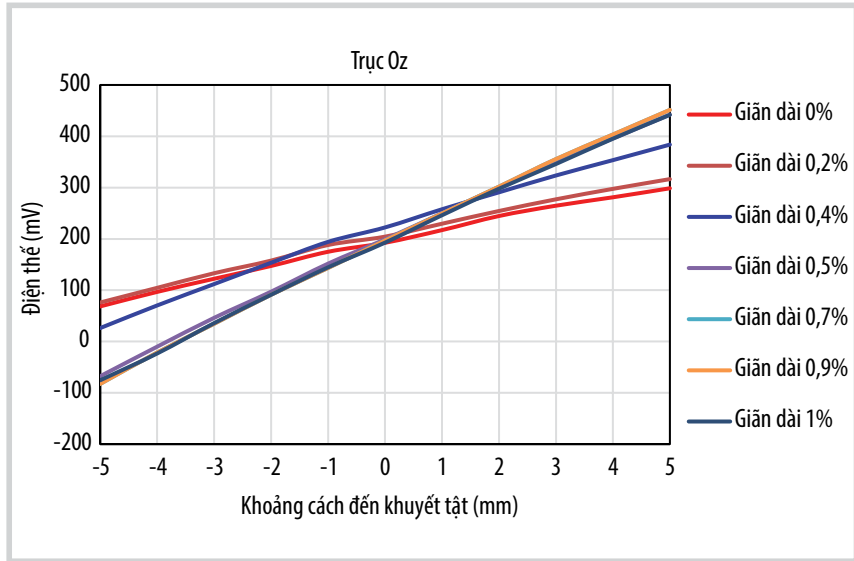
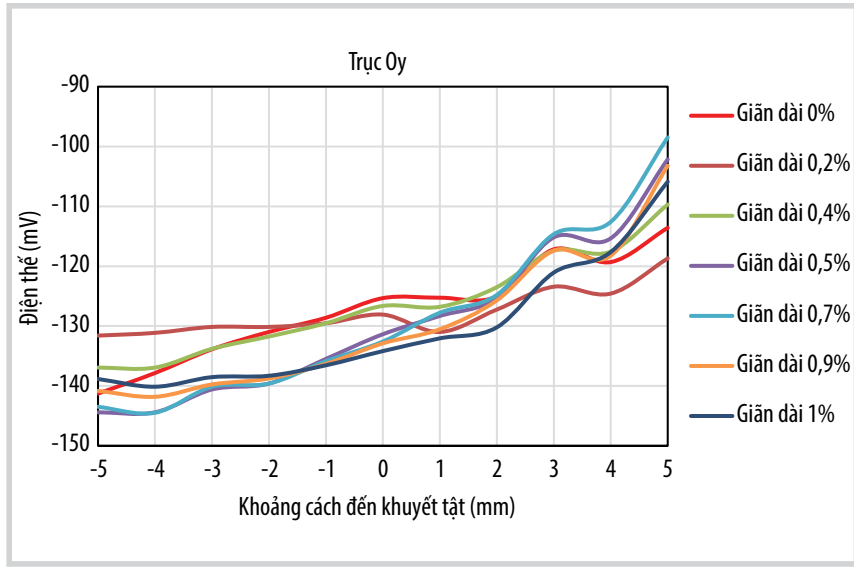
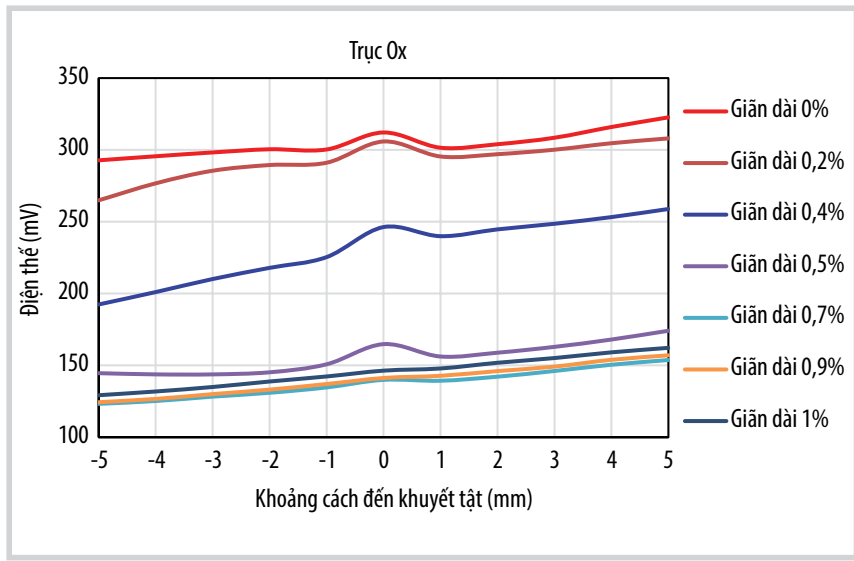
Các giá trị từ trường được đo bằng thiết bị tự chế tạo. Đầu dò cảm biến của thiết bị được di chuyển dọc theo chiều dài của mẫu thử nghiệm với khoảng cách không đổi so với bề mặt mẫu; các mẫu chịu ứng suất kéo tương ứng với độ giãn dài của mẫu thử nghiệm. Thiết bị đo từ trường xác định độ biến thiên từ trường ngoài tạo ra xung quanh mẫu thép. Các kết quả từ trường được ghi nhận và phân tích, đánh giá và xác định vị trí có ứng suất tập trung (tương ứng với vị trí khuyết tật dưới tác động của lực kéo cơ học).

4. Kết quả thu được

Thiết bị đo từ trường tự chế tạo đã được sử dụng để khảo sát sự biến đổi từ trường trái đất xung quanh mẫu kim loại có khuyết tật nhân tạo dưới tác dụng của ứng suất kéo. Cảm biến được di chuyển song song dọc bề mặt mẫu và cách bề mặt mẫu 2 cm. Các tín hiệu từ trường được thu nhận theo 3 trục Ox - phương song song với chiều dài mẫu, Oy - phương song song với chiều ngang của mẫu và Oz - phương vuông góc với bề mặt mẫu. Các kết quả khảo sát từ trường tại các điểm -5, -4, -3, -2, -1 cm và



Hình 7. Sự biến thiên từ trường theo độ giãn dài của các mẫu thép thử nghiệm



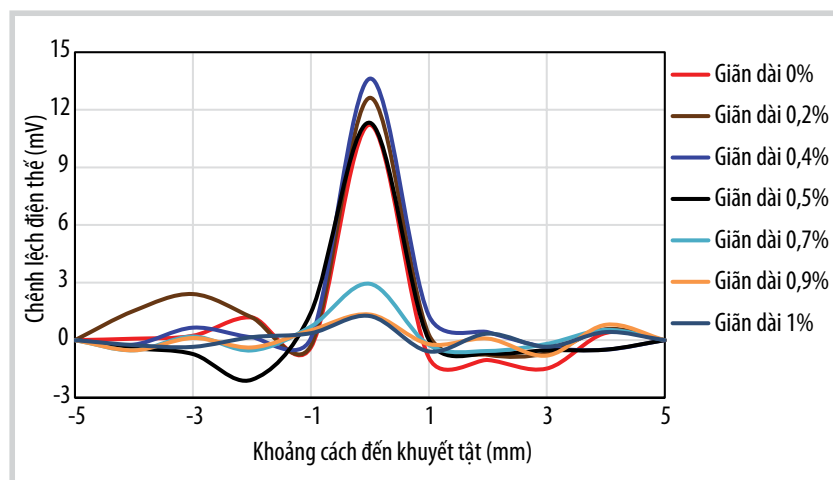
Hình 8. Sự biến thiên từ trường dọc theo chiều dài mẫu chịu tác động của ứng suất kéo

1, 2, 3, 4, 5 cm so với khuyết tật nhân tạo (điểm 0) tại các ứng suất kéo tác động lên mẫu thép tương ứng với các giá trị độ giãn dài khác nhau của mẫu đã được ghi nhận.

Hình 7 biểu diễn sự biến thiên từ trường theo độ giãn dài của mẫu thép trong quá trình thử nghiệm kéo. Kết quả thu được cho thấy từ trường biến đổi mạnh khi độ giãn dài của mẫu < 1 mm. Tại thời điểm mẫu bị kéo giãn tương ứng với ứng suất kéo tăng, từ trường có sự biến đổi mạnh trên cả 3 trục Ox, Oy và Oz. Khi mẫu bị kéo giãn > 1 mm, tương ứng với độ giãn dài tương đối trên 0,5%, từ trường có xu hướng ít biến đổi, có thể dự đoán kim loại đã chuyển sang trạng thái biến dạng dẻo.

Sự biến thiên của từ trường thu được qua vị trí có khuyết tật (điểm 0) ứng với độ giãn dài khác nhau được biểu diễn trên Hình 8. Do lực kéo tác dụng dọc chiều dài mẫu theo phương trục Ox nên sự tác động lực và biến dạng mẫu theo phương Ox là rõ ràng và từ trường có sự biến thiên lớn nhất. Khi độ giãn dài tương đối của mẫu < 0,5%, tương ứng với vùng đàn hồi của mẫu kim loại, dễ dàng phát hiện ra vị trí khuyết tật thông qua sự thay đổi từ trường xung quanh khuyết tật. Tuy nhiên khi độ giãn dài > 0,5%, kim loại có khả năng chuyển sang trạng thái biến dạng dẻo, moment từ đạt trạng thái bão hòa do đó từ trường ít biến đổi và không thấy rõ sự khác biệt từ trường xung quanh vị trí khuyết tật.

Các đường ống và thiết bị áp lực luôn được thiết kế để hoạt động trong trạng thái biến dạng đàn hồi của vật liệu. Do đó, thiết bị đo từ trường chế tạo được có thể xác định từ trường rò bất thường tạo ra tại các vị trí khuyết tật của vật liệu sắt từ làm việc trong vùng đàn hồi có ý nghĩa lớn trong việc áp dụng thực tế.



Hình 9. Biến thiên điện thế dọc theo chiều dài mẫu chịu tác động của ứng suất kéo

Ngoài địa từ trường (từ trường trái đất), từ trường bất thường tạo ra do ứng suất tập trung, từ trường đo được còn có thể do các nguồn khác như từ trường của nguồn điện, các vật liệu, thiết bị bằng sắt thép xung quanh... Do đó, để loại bỏ các từ trường nền và nhiễu, chỉ quan tâm đến từ trường rò "tự nhiên" sinh ra từ khuyết tật do sự tập trung ứng suất, sự biến thiên từ trường (gradient từ trường) dọc theo chiều dài mẫu thử nghiệm tại các ứng suất kéo khác nhau (tương ứng với độ giãn dài của mẫu thử nghiệm) đã được xác định và biểu thị trên Hình 9. Các kết quả thu được cho thấy trong vùng biến dạng đàn hồi của vật liệu, tại vị trí khuyết tật (điểm 0), tương ứng với ứng suất tập trung lớn nhất, có thể quan sát rõ sự biến thiên từ trường lớn nhất chứng tỏ khả năng của thiết bị chế tạo được trong việc phát hiện, dự báo các vị trí khuyết tật của của vật liệu sắt chịu áp lực thông qua các vị trí từ trường bất thường.

5. Kết luận

Trên cơ sở nguyên lý Villari, thiết bị cảnh báo sớm khuyết tật bằng phương pháp từ đã được Viện Dầu khí Việt Nam chế tạo thành công, với phạm vi làm việc từ -300 μT đến 300 μT. Thiết bị đã được thử nghiệm đo từ trường rò đối với mẫu thép API 5L có khuyết tật nhân tạo dưới tác dụng của ứng suất kéo cho các kết quả ban đầu khả quan. Thiết bị ghi nhận từ trường xung quanh các mẫu thép dạng chày trong quá trình thử nghiệm kéo đã cho thấy rõ sự biến thiên đáng kể của từ trường ở độ giãn dài < 1 mm (tương ứng với trạng thái biến dạng đàn hồi của vật liệu). Trong trường hợp có khuyết tật, thiết bị có khả năng phát hiện sự thay đổi của từ trường tại các vị trí khuyết tật do tập trung ứng suất. Các nghiên cứu đạt được đã mở ra hướng nghiên cứu mới chế tạo thiết bị kiểm tra không phá hủy xác định các nguy cơ hư hỏng tiềm tàng mà không cần tiếp xúc trực tiếp với bề mặt kim loại.

Tài liệu tham khảo

[1] Ravi Prakash, *Non-destructive testing techniques*. New Age Science, 2009.
 [2] J.P. Joule, "On the effects of magnetism upon the dimensions of iron

and steel bars", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 30, pp. 76-87, 1847. DOI: 10.1080/14786444708645656.

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

[4] Punit Arora, P.K.Singh, V.Bhasin, K.K.Vaze, D.M.Pukazhendhi, P.Gandhi, and G.Raghava, "Fatigue crack growth behavior in pipes and elbows of carbon steel and stainless steel materials", *Procedia Engineering*, Vol. 55, pp. 703 - 709, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.318.

[5] 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.

[6] Le Sun, Xin'en Liu, and Hongpan Niu, "A method for identifying geometrical defects and stress concentration zones in MMM technique", *NDT & E International*, Vol. 107, 2019. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102133.

[7] Anatolii 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*.

[8] M.Roskosz and P.Gawrilenko, "Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples", *NDT & E International*, Vol. 41, No. 7, pp. 570 - 576, 2008. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.04.002.

[9] Shi Changliang, Dong Shiyun, Xu Binshi and He Peng, "Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load", *NDT & E*



International, Vol. 43, No. 1, pp. 8 - 12, 2010. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.002.

[10] Caoyuan Pang, Jianting Zhou, Ruiqiang Zhao, Hu Ma and Yi Zhou, "Resear on internal force detection method of steel bar in plastic and yielding stage based on metal magnetic memory", *Materials*, Vol. 12, No. 7, 2019. DOI: 10.3390/ma12071167.

[11] Guo Pengju, Chen Xuedong, Guan Weihe, Cheng Huayun, and Jiang Heng, "Effect of tensil 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Stephen G.H. Staples, "Using magnetostriction and the villari effect to detect anomalies in steel materials", PhD Transfer Report, June 26, 2012.

[15] Nguyễn Thị Lê Hiền, Đoàn Thành Đạt và Lê Thị Phương Nhung, "Sử dụng nguyên lý Villari và kỹ thuật nhớ từ trong kiểm tra vật liệu từ chịu lực", *Tạp chí Dầu khí*, Số 8, tr. 60 - 66, 2020.

DESIGN AND ASSEMBLY OF AN APPARATUS SYSTEM BASED ON THE VILLARI EFFECT FOR DETECTING STRESS CONCENTRATION ZONE ON FERROMAGNETIC MATERIALS

Nguyen Thi Le Hien, Doan Thanh Dat

Vietnam Petroleum Institute

Email: hienntl@vpi.pvn.vn

Summary

This paper presents the study results on the fabrication of a structural integrity assessment apparatus by determining stress concentration zones in pressure pipeline and equipment. The apparatus uses a triaxial magnetic field sensor to measure magnetic field components in three axes O_x , O_y , and O_z , in the working range of the magnetic field from $-300 \mu T$ to $300 \mu T$. The investigation of the self-magnetic leakage field by this apparatus in the API 5L steel specimens under tensile stress shows a high variation of the magnetic field at a steel elongation lower than 1 mm (corresponding to the elastic deformation state of the material). In the case of an artificial defect, the apparatus can detect a change in the magnetic field caused by stress concentration.

Key words: Magnetic field apparatus, stress concentration zone, integrity assessment, defect detection, self-magnetic flux leakage.