

Hiệu suất của bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài cho công trình kim loại ngầm trong môi trường đất

Nguyễn Ngọc Phong, Đỗ Chí Linh*, Phạm Hồng Hạnh, Phạm Thy San, Ngô Thị Ánh Tuyết

Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

Ngày nhận bài 18/11/2019; ngày chuyển phản biện 22/11/2019; ngày nhận phản biện 25/12/2019; Ngày chấp nhận đăng 31/12/2019

Tóm tắt:

Các hệ thống bồn chứa và các hệ thống ống dẫn đặt ngầm trong môi trường đất là các cơ sở hạ tầng thiết yếu của nền kinh tế. Dưới ảnh hưởng của các điều kiện môi trường như độ ẩm, pH..., vấn đề ăn mòn của các công trình kim loại ngầm trong đất gây ảnh hưởng rất lớn về kinh tế cũng như kỹ thuật. Bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài (ICCP) là một phương pháp hiệu quả nhất trong chống ăn mòn cho các công trình ngầm trong môi trường đất và được quan tâm nghiên cứu nhiều trên thế giới. Trong nghiên cứu này, phương pháp bảo vệ catot ICCP sử dụng anot trợ nền titan phủ hỗn hợp oxit kim loại (MMO) chống ăn mòn cho kim loại thép cacbon trong môi trường đất đã được triển khai. Ảnh hưởng của các môi trường đất khác nhau đến tốc độ ăn mòn của các ống thép cacbon cũng đã được khảo sát. Cuối cùng, hiệu suất bảo vệ catot tại các giá trị điện thế bảo vệ $-0,85$ V, $-0,95$ V và $-1,05$ V (Ag/AgCl) trong các môi trường đất khác nhau đã được nghiên cứu đánh giá.

Từ khóa: anot trợ phủ hỗn hợp oxit kim loại MMO, ăn mòn, bảo vệ catot, điện thế bảo vệ, môi trường đất.

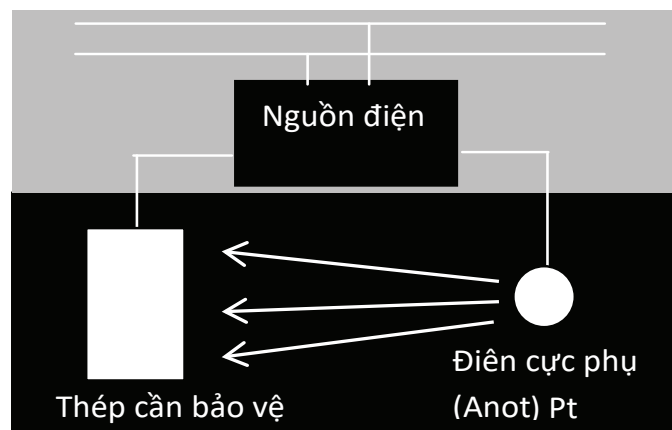
Chỉ số phân loại: 2.5

Mở đầu

Các hệ thống đường ống dẫn ngầm trong môi trường đất và các bể chứa là các cơ sở hạ tầng thiết yếu của ngành công nghiệp. Trong môi trường đất, các công trình kim loại rất dễ bị ăn mòn và đây là một vấn đề nghiêm trọng cả về kỹ thuật cũng như kinh tế. Theo một số khảo sát, khoảng 70% các ống kim loại đen bị hư hỏng do vấn đề ăn mòn tại các nước Canada, Anh và Úc [1]. Có nhiều yếu tố khác nhau của môi trường đất có ảnh hưởng nghiêm trọng đến tốc độ ăn mòn của các công trình kim loại trong đất, bao gồm pH, độ ẩm, độ dẫn điện, nhiệt độ, độ thấm... Các nguyên nhân này cũng dẫn đến sự đa dạng của các loại hình ăn mòn các công trình kim loại trong môi trường đất như ăn mòn đều, ăn mòn lỗ, ăn mòn khe và ăn mòn hốc [1, 2].

Chống ăn mòn kim loại là yêu cầu bắt buộc theo các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế và trong nước khi thi công xây dựng các công trình ngầm trong môi trường đất. Có nhiều phương pháp khác nhau có thể sử dụng chống ăn mòn cho các công trình kim loại trong môi trường đất như sử dụng sơn phủ, chất ức chế... trong đó, phương pháp bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài ICCP là hiệu quả nhất, với thời gian bảo vệ có thể lên tới 30 năm tùy theo mục đích sử dụng. Nguyên tắc của phương pháp bảo vệ catot là ngăn cản sự hình thành các vùng anot trên bề mặt kim loại bằng cách cung cấp đủ điện tử đến các vùng anot để không cho quá trình ăn mòn

kim loại xảy ra. Hình 1 là sơ đồ nguyên lý của phương pháp bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài ICCP. Trong hệ thống ICCP, cực âm của nguồn điện một chiều được nối với công trình cần bảo vệ và cực dương nối với điện cực phụ (gang silic, graphite, hợp kim chì, Pt, hỗn hợp oxit dẫn điện...) được nhúng trong môi trường điện ly. Khi có một dòng điện một chiều DC được áp vào từ một điện cực phụ qua môi trường điện ly đến bề mặt kim loại, dòng điện sẽ ưu tiên chạy đến vùng catot, do đó điện thế ở vùng này sẽ dịch chuyển về phía âm do phân cực catot và đạt đến điện thế của vùng anot. Khi catot phân cực đến điện thế bằng điện thế anot thì những pin ăn mòn sẽ bị loại trừ.



Hình 1. Nguyên lý bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài.

*Tác giả liên hệ: Email: linhdc@ims.vast.ac.vn

Efficiency of impressed current cathodic protection for underground metallic structures

Ngoc Phong Nguyen, Chi Linh Do*,
Hong Hanh Pham, Thy San Pham, Thi Anh Tuyet Ngo

*Institute of Materials Science,
Vietnam Academy of Science and Technology*

Received 18 November; accepted 31 December 2019

Abstract:

All over the world, gas, water and oil pipelines, storage tanks and many other structures buried in the soil have been played an important role in the economy. Under the soil environmental factors such as moisture, pH, etc the corrosion of metallic structures buried in soil or in contact with soil has caused the serious engineering and economic problems. Impressed current cathodic protection ICCP has been the most effective method for corrosion prevention of the underground metallic structures. In this paper, an ICCP system using titanium anode coated with mixed metallic oxides MMO for corrosion prevention of ferrous pipelines was investigated. The influence of various soil environment on corrosion rate of ferrous pipelines was also evaluated. Finally, the efficiency of ICCP system at protection potentials of -0.85 V, -0.95 V, and -1.05 V (Ag/AgCl) in the various soil environments was studied.

Keywords: corrosion, impressed current cathodic protection ICCP, mixed metallic oxides MMO, protection potentials, soil.

Classification number: 2.5

Hiện nay, công nghệ ICCP đã được áp dụng phổ biến trong chống ăn mòn cho các công trình ngầm trong đất. Tiêu chuẩn phổ biến áp dụng trong phương pháp là điện thế bảo vệ của công trình cần đạt được tối thiểu -850 mV (Ag/AgCl) [1, 3]. Tuy nhiên, trong môi trường đất, sự đồng đều vật chất là rất khó xảy ra nên hiệu suất chống ăn mòn khi áp dụng phương pháp ICCP là rất khác nhau. Do đó, các nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số môi trường đất, các thông số bảo vệ của hệ thống ICCP và mô phỏng môi trường nghiên cứu đánh giá hiệu suất hệ thống bảo vệ ICCP vẫn đang rất được quan tâm nghiên cứu trên thế giới [4-6].

Tại Việt Nam, việc chống ăn mòn cho các công trình ngầm cũng đã được quan tâm nghiên cứu bởi các trường đại học và viện nghiên cứu chuyên ngành. Phương pháp ICCP cũng đã được nghiên cứu ứng dụng cho bảo vệ một số công trình ngầm trong đất. Trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã nghiên cứu bảo vệ tuyến đường ống dẫn xăng dầu của Xí nghiệp xăng dầu B12 Quảng Ninh bằng hệ anốt gang silic. Các tuyến ống dẫn ngầm trong đất tại Nhà máy đạm Phú Mỹ, đạm Cà Mau, Nhà máy lọc dầu Bình Sơn (Dung Quất) cũng đã được lắp đặt hệ thống ICCP. Tuy nhiên, việc chế tạo và lắp đặt hệ thống bảo vệ tại các nhà máy này đều do các công ty nước ngoài thực hiện. Từ năm 2006 Viện Khoa học Vật liệu đã nghiên cứu chế tạo điện cực anốt trên cơ sở titan phủ hỗn hợp ôxit kim loại (MMO) để ứng dụng trong một số lĩnh vực, trong đó có lĩnh vực bảo vệ catot chống ăn mòn. Hệ anốt trên phủ hỗn hợp ôxit kim loại quý hiếm này mặc dù có giá thành đầu tư cao nhưng thể hiện nhiều tính năng vượt trội, nên ngày nay được áp dụng rộng rãi trên khắp thế giới. Năm 2010 Viện Khoa học Vật liệu đã thiết kế chế tạo hệ thống bảo vệ catot cho Xí nghiệp xăng dầu Vũng Tàu để bảo vệ tuyến đường ống dẫn xăng dầu chạy dưới biển từ cảng xuất nhập vào đất liền. Như vậy, việc nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống ICCP chống ăn mòn cho các công trình ngầm là rất cần thiết nhằm làm chủ được công nghệ và cung cấp thiết bị thay thế các thiết bị nhập ngoại. Trong nghiên cứu này, công nghệ bảo vệ catot ICCP sử dụng anốt trên nền titan phủ hỗn hợp ôxit kim loại MMO chống ăn mòn cho kim loại thép cacbon trong môi trường đất đã được triển khai. Ảnh hưởng của các môi trường đất khác nhau đến ăn mòn kim loại thép cacbon cũng đã được khảo sát. Cuối cùng, hiệu suất bảo vệ catot tại các giá trị điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V (Ag/AgCl) trong các môi trường đất khác nhau đã được nghiên cứu đánh giá.

Thực nghiệm

Chế tạo điện cực anốt trên MMO

Anốt trên nền titan phủ hỗn hợp ôxit kim loại MMO được chế tạo bằng phương pháp phân hủy nhiệt. Dung dịch phủ lên bề mặt titan để tạo lớp phủ ôxit được chuẩn bị từ các muối kim loại: clorua ruthenium $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, clorua iridi

$\text{IrCl}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ và clorua titan TiCl_3 . Ngoài ra còn dùng một số hoá chất khác trong quá trình chế tạo anot như butanol, HCl ... Thành phần dung dịch phủ và quy trình tạo lớp phủ ôxit theo tài liệu [7, 8].

Chuẩn bị môi trường đất trong thí nghiệm

Để khảo sát ảnh hưởng của điện trở đất đến hiệu suất bảo vệ catot, ba loại đất có thành phần khác nhau đã được chuẩn bị trong nghiên cứu, bao gồm:

- Mẫu đất 1 (M1): đất thịt trộn cát sông tỷ lệ 1: 1 về khối lượng.
- Mẫu đất 2 (M2): đất thịt trộn cát sông tỷ lệ 1: 3 về khối lượng.
- Mẫu đất 3 (M3): đất thịt trộn cát sông tỷ lệ 1: 3 về khối lượng và pha thêm Cl^- nồng độ 500 ppm.

Các mẫu đất sau khi pha trộn được đổ vào hộp gỗ có kích thước 300x80x80 cm được chia làm ba khoang. Hình ảnh của hệ thống bảo vệ catot được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Hình ảnh chuẩn bị thí nghiệm bảo vệ catot cho các mẫu thép trong môi trường đất.

Thí nghiệm bảo vệ catot

Chín mẫu ống thép (ký hiệu tương ứng O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8 và O9) được chôn trong các môi trường đất khác nhau M1, M2 và M3. Mỗi môi trường đất được chôn ba mẫu cùng với điện cực anot MMO và các mẫu này được áp các điện thế bảo vệ tương ứng là -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V đo theo điện cực so sánh Ag/AgCl . Các giá trị điện thế này được đo và điều chỉnh hàng ngày sử dụng một hệ thống biến trở. Các giá trị dòng điện đi qua mỗi mẫu được đo bằng ampe kế và ghi lại giá trị theo thời gian. Thời gian thử nghiệm được thực hiện trong 100 ngày. Ngoài ra, các mẫu thép không được bảo vệ catot cũng được chôn với cùng điều kiện để làm đối chứng.

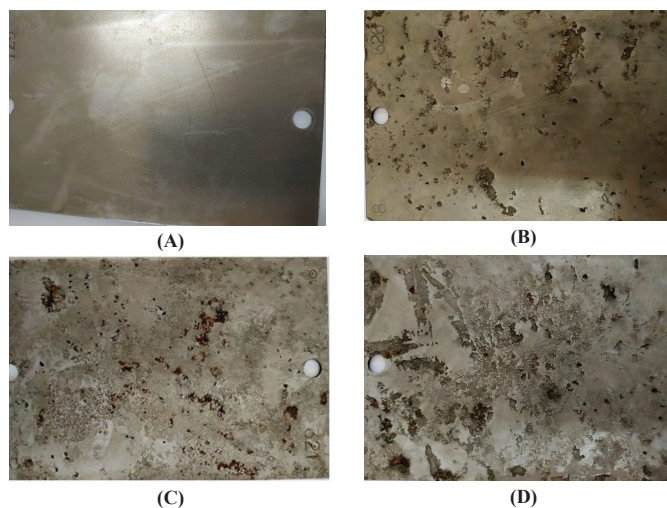
Các mẫu thép được nghiên cứu đánh giá bằng phương pháp chụp ảnh và phương pháp tổn hao khối lượng. Trong phương pháp tổn hao khối lượng, các mẫu được xác định khối lượng trước và sau khi thử nghiệm bảo vệ catot. Khối lượng của mẫu thép được đo bằng cân có độ chính xác tới 0,01 g. Từ các kết quả này có thể tính được tổn hao khối lượng của các mẫu khi có và không có bảo vệ catot. Thêm nữa, cũng từ các giá trị tổn hao khối lượng này có thể xác định được hiệu suất bảo vệ catot tại các điều kiện khác nhau theo công thức:

$$\text{Hiệu suất bảo vệ} = \frac{\Delta m_1 - \Delta m_2}{\Delta m_1} \times 100$$

Trong đó: Δm_1 là tổn hao khối lượng của các mẫu không được bảo vệ catot, g; Δm_2 là tổn hao khối lượng của các mẫu có bảo vệ catot, g.

Kết quả và thảo luận

Nghiên cứu ăn mòn của mẫu thép trong môi trường đất



Hình 3. Bề mặt mẫu thép trước và sau thử nghiệm ăn mòn trong môi trường đất với thời gian 100 ngày: (A) Mẫu trước thử nghiệm, (B) Mẫu thử nghiệm trong môi trường đất M1, (C) Mẫu thử nghiệm trong môi trường đất M2, (D) Mẫu thử nghiệm trong môi trường đất M3.

Hình 3 là hình ảnh bề mặt mẫu thép trước và sau khi thử nghiệm. Các mẫu trước thử nghiệm có bề mặt sạch và bóng. Sau thử nghiệm ăn mòn trong đất với thời gian 100 ngày, quan sát bề mặt mẫu có thể thấy rõ các mẫu đã bị ăn mòn cục bộ và xuất hiện rất nhiều các lỗ và hốc ăn mòn. Điều này có thể do đặc trưng môi trường đất có sự rất không đồng đều nên dễ tạo ra sự khác biệt về nồng độ chất gây ăn mòn trên toàn bộ bề mặt mẫu. Bề mặt mẫu thử nghiệm trong môi trường đất M3 dường như bị ăn mòn nhiều hơn với sự xuất hiện của mật độ hốc ăn mòn nhiều hơn. Nguyên nhân có thể được lý giải do sự có mặt thêm của ion Cl^- với nồng độ 500 ppm đã làm giảm điện trở của đất và làm tăng tốc độ ăn mòn của mẫu thép.

Bảng 1 là các giá trị điện thế ăn mòn của các mẫu thép trong các môi trường đất khác nhau trước khi được áp dòng điện bảo vệ. Nhìn chung, các giá trị điện thế của các mẫu thép đều khá âm, chứng tỏ các mẫu này có thể sẽ bị ăn mòn nhiều trong các môi trường đất thử nghiệm.

Bảng 1. Điện thế ăn mòn của các mẫu thép trong các môi trường đất khác nhau.

Môi trường đất	M1			M2			M3		
Mẫu	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Điện thế ăn mòn (mV; Ag/AgCl)	-324	-365	-381	-462	-372	-392	-543	-551	-461

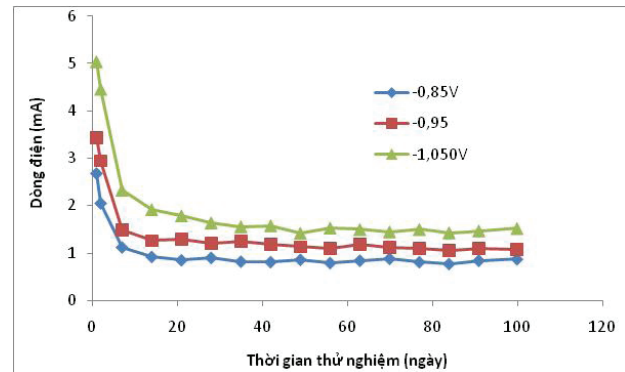
Bảng 2 trình bày các kết quả đo tổn hao khối lượng của các mẫu thép đã được thử nghiệm 100 ngày trong các môi trường đất khác nhau. Mẫu thép chôn trong môi trường M3 có giá trị tổn hao khối lượng lớn nhất (lên tới 9,48 g), trong khi các giá trị này tương ứng với các môi trường M1 và M2 chỉ là 3,30 và 6,08 g. Điều này có nghĩa tốc độ ăn mòn của mẫu thép trong môi trường đất M3 là cao nhất.

Bảng 2. Tổn hao khối lượng các mẫu thép không bảo vệ sau 100 ngày thử nghiệm trong các môi trường đất khác nhau.

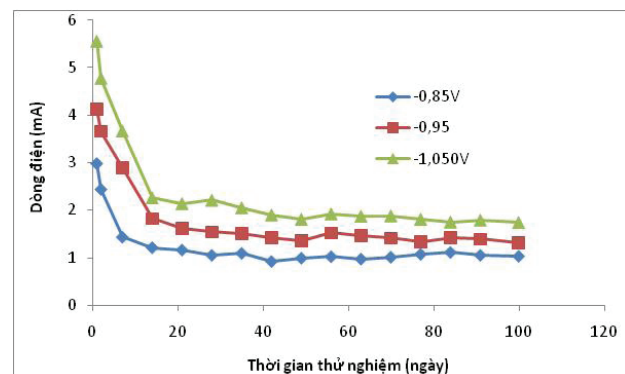
Môi trường đất	M1	M2	M3
Tổn hao khối lượng (g)	3,30	6,08	9,48

Nghiên cứu ảnh hưởng của môi trường đất đến hiệu suất bảo vệ catot

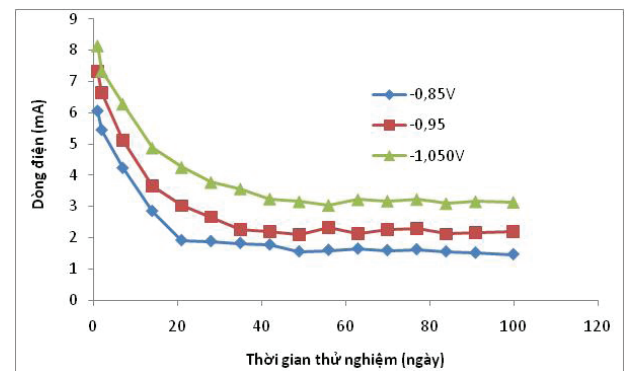
Sau khi đấu điện vận hành hệ thống bảo vệ catot, giá trị dòng điện đi qua mỗi mẫu sẽ được đo theo thời gian thử nghiệm. Hình 4 biểu diễn đồ thị thay đổi của giá trị dòng điện bảo vệ theo thời gian thử nghiệm tại các điện thế bảo vệ của hệ thống ICCP khác nhau. Nhìn chung, trong thời gian thử nghiệm ban đầu, các giá trị dòng điện bảo vệ cần rất cao. Điều này có thể được giải thích do khi bắt đầu, các mẫu cần năng lượng đủ lớn để dịch chuyển trạng thái bề mặt sang một cân bằng mới. Các phản ứng điện hóa xảy ra trên bề mặt mẫu giúp dịch chuyển cân bằng của quá trình ăn mòn kim loại theo hướng giảm tốc độ hòa tan của sắt [1, 3, 5]. Sau một thời gian thử nghiệm, các giá trị dòng điện bảo vệ giảm xuống và dần ổn định. Lúc này, bề mặt mẫu đã đạt cân bằng và hiệu quả của quá trình bảo vệ catot đã trở nên rất đáng kể. Và từ thời điểm này, mẫu chỉ cần một dòng điện không lớn cũng đã đủ để duy trì cho điện thế bề mặt đủ cho yêu cầu bảo vệ. Trên các đồ thị, sự ổn định của giá trị dòng điện bảo vệ catot cho các mẫu đã được đảm bảo trong suốt 100 ngày thử nghiệm. Điều này cũng chứng tỏ, điện cực anot trơ MMO chế tạo sử dụng trong thử nghiệm này đã có tính chất điện rất tốt, vận hành hiệu quả và đã đảm bảo duy trì quá trình cung cấp dòng điện cho cả hệ thống bảo vệ catot trong suốt thời gian thử nghiệm.



Môi trường đất M1



Môi trường đất M2

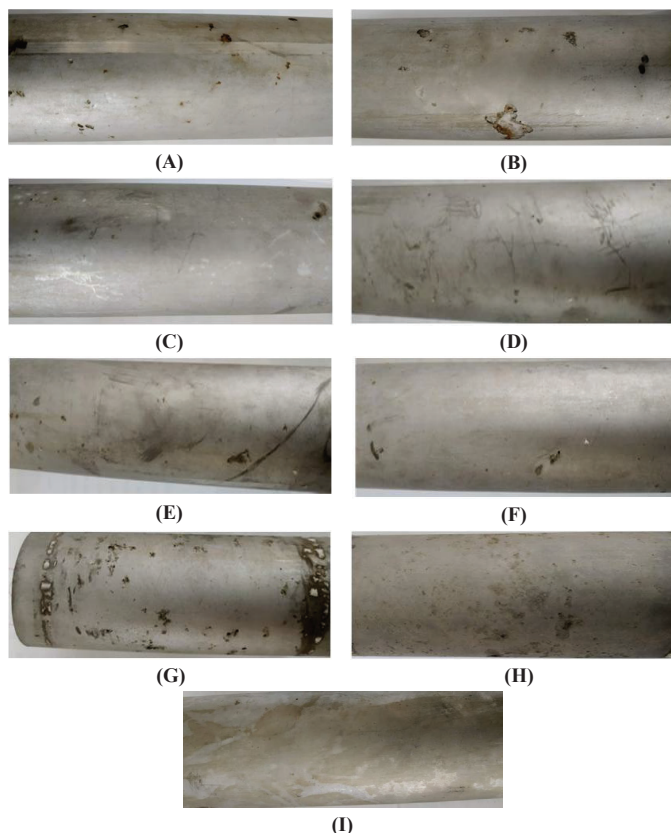


Môi trường đất M3

Hình 4. Đồ thị thay đổi dòng điện của các mẫu được áp điện thế bảo vệ khác nhau trong các môi trường đất M1, M2 và M3 với thời gian thử nghiệm 100 ngày.

Sau 100 ngày thử nghiệm bảo vệ catot, các mẫu ống thép được lấy ra khỏi các môi trường đất và tiến hành đo đạc, đánh giá hiệu suất bảo vệ catot. Hình 5 là hình ảnh bề mặt của các mẫu ống thép được bảo vệ catot tại các điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V trong các môi trường đất M1, M2 và M3. So với các mẫu đối chứng không được bảo vệ, bề mặt các ống vẫn giữ được sự nhẵn mịn và xuất hiện rất ít các lỗ và hốc ăn mòn. Điều này đã xác nhận hiệu quả chống ăn mòn của phương pháp bảo vệ catot. Với các mẫu

thử nghiệm trong môi trường đất M3, tại các giá trị điện thế bảo vệ thấp, bề mặt mẫu vẫn xuất hiện các hốc ăn mòn. Hiện tượng này chỉ chấm dứt hoàn toàn khi sử dụng giá trị điện áp bảo vệ -1,05 V. Điều đó có thể do môi trường đất M3 có điện trở thấp và sự có mặt thêm của ion Cl^- đã làm tăng tốc độ ăn mòn nên điều kiện bảo vệ catot cũng cần được áp dụng với tiêu chuẩn cao hơn.



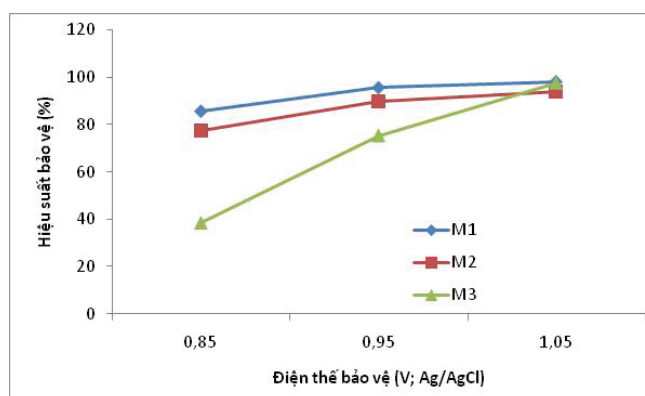
Hình 5. Hình ảnh bề mặt của các mẫu ống thép được bảo vệ catot tại các điện thế bảo vệ và môi trường đất khác nhau: (A) Điện thế bảo vệ -0,85 V trong môi trường đất M1; (B) Điện thế bảo vệ -0,95 V trong môi trường đất M1; (C) Điện thế bảo vệ -1,05 V trong môi trường đất M1; (D) Điện thế bảo vệ -0,85 V trong môi trường đất M2; (E) Điện thế bảo vệ -0,95 V trong môi trường đất M2; (F) Điện thế bảo vệ -1,05 V trong môi trường đất M2; (G) Điện thế bảo vệ -0,85 V trong môi trường đất M3; (H) Điện thế bảo vệ -0,95 V trong môi trường đất M3; (I) Điện thế bảo vệ -1,05 V trong môi trường đất M3.

Các mẫu sau thử nghiệm được đánh giá tổn hao khối lượng bằng phương pháp cân mẫu trước và sau khi thử nghiệm. Bảng 3 thể hiện các kết quả tổn hao trọng lượng của các mẫu được bảo vệ catot tại các điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V trong các môi trường đất M1, M2 và M3. Khi có bảo vệ catot, tốc độ ăn mòn của các mẫu thép giảm xuống rất nhiều. Tại giá trị điện thế bảo vệ -1,05 V, các mẫu thép có tổn hao trọng lượng rất nhỏ, nghĩa là các mẫu hầu như đã không bị ăn mòn.

Bảng 3. Kết quả đo tổn hao khối lượng của các mẫu ống thép được bảo vệ catot tại các điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V trong các môi trường đất M1, M2 và M3.

Môi trường đất	Điện thế bảo vệ (V; Ag/AgCl)		
	-0,85 V	-0,95 V	-1,05 V
M1	0,75 g	0,64 g	0,59 g
M2	0,47 g	0,27 g	0,19 g
M3	2,03 g	1,50 g	0,23 g

Bảng cách so sánh tương đối các giá trị tổn hao khối lượng của các mẫu khi có và không có bảo vệ catot, giá trị hiệu suất bảo vệ catot cho các mẫu đã được tính toán và rút ra. Hình 6 là đồ thị biểu diễn hiệu suất bảo vệ catot cho các mẫu tại các giá trị điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V trong các môi trường đất M1, M2 và M3. Các giá trị hiệu suất bảo vệ đều tăng khi tăng giá trị điện thế bảo vệ. Với môi trường đất M3, hiệu suất bảo vệ chỉ đạt khoảng 39% khi áp điện thế bảo vệ -0,85 V. Tại giá trị điện thế -1,05 V, hiệu suất bảo vệ catot đạt được rất cao, lên tới 98% trong cả ba loại môi trường đất.



Hình 6. Đồ thị hiệu suất bảo vệ catot cho các mẫu tại các giá trị điện thế bảo vệ -0,85 V, -0,95 V và -1,05 V trong các môi trường đất M1, M2 và M3.

Kết luận

1) Môi trường đất có ảnh hưởng nhiều đến tốc độ ăn mòn của các mẫu thép. Trong điều kiện thử nghiệm 100 ngày, các mẫu thép bị ăn mòn cục bộ với sự xuất hiện rất nhiều các lỗ và hốc ăn mòn. Mẫu thép chôn trong môi trường M3 bị ăn mòn nhiều nhất, với giá trị tổn hao khối lượng lớn nhất lên tới 9,8 g.

2) Hiệu suất chống ăn mòn của hệ thống bảo vệ catot ICCP trong ba loại môi trường đất khác nhau đã được nghiên cứu đánh giá. Với điện áp bảo vệ -1,05 V (Ag/AgCl), hiệu suất bảo vệ cao nhất cho các mẫu thép chôn trong đất của hệ thống bảo vệ catot ICCP lên tới 98%, nghĩa là các mẫu thép hầu như không bị ăn mòn.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hoàn thành với sự hỗ trợ kinh phí của đề tài NCVCC 04.07/19-19. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Lazzari, P. Pedferri (2006), *Cathodic protection, 1st edision*.
- [2] A.E. Romer, G.E. Bell (2001), *Causes of external corrosion on buried water mains*, Pipeline Division Specialty Conference.
- [3] TCVN 6051:1995, Hệ bảo vệ catot - Yêu cầu thiết kế, lắp đặt và kiểm tra.
- [4] Muhammad Wasim, Shahrukh Shoaib, N.M. Mubarak, Inamuddin, Abdullah M. Asiri (2018), “Factors influencing corrosion of metal pipes in soils”, *Environmental Chemistry Letters*, **16**, pp.879-961.
- [5] Roman Kodym, Dalimil Snita, Vlastimil Fíla, Karel Bouzek, Milan Kouril (2017), “Investigation of processes occurring at cathodically protected underground installations: Mathematical modeling of reaction transport processes in soil”, *Corrosion Science*, **120**, pp.28-41.
- [6] Mingjie Dai, Jing Liu, Feng Huang, Yaohua Zhang, Y. Frank Cheng (2018), “Effect of cathodic protection potential fluctuations on pitting corrosion of X100 pipeline steel in acidic soil environment”, *Corrosion Science*, **143**, pp.428-437.
- [7] Nguyễn Ngọc Phong, Đỗ Chí Linh, Phạm Hồng Hạnh, Phạm Quang Ngân, Phạm Xuân Ngọc (2019), “Nghiên cứu phát triển hệ thống bảo vệ catot bằng dòng điện ngoài chống ăn mòn vỏ tàu biển”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam series B*, **61(3)**, tr.53-57.
- [8] Nguyễn Ngọc Phong, Đỗ Chí Linh, Phạm Hồng Hạnh, Phạm Xuân Ngọc (2017), “Nghiên cứu điện cực anot trợ hỗn hợp oxit kim loại cho bảo vệ catot chống ăn mòn vỏ tàu biển”, *Tạp chí Hóa học*, **55**, tr.388-391.