

Nghiên cứu phát triển hệ thống bảo vệ catôt bằng dòng điện ngoài chống ăn mòn vỏ tàu biển

Nguyễn Ngọc Phong¹, Đỗ Chí Linh^{1*},
Phạm Hồng Hạnh¹, Phạm Quang Ngân¹, Phạm Xuân Ngọc²

¹Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

²Viện Kỹ thuật Hải quân, Quân chủng Hải quân

Ngày nhận bài 1/8/2018; ngày chuyển phản biện 7/8/2018; ngày nhận phản biện 10/9/2018; ngày chấp nhận đăng 14/9/2018

Tóm tắt:

Gần đây, hệ thống bảo vệ catôt bằng dòng điện ngoài (ICCP) sử dụng các anôt trơ nền Ti phủ hỗn hợp ôxit hiếm MMO (mixed metal oxides) đã được ứng dụng rộng rãi trong bảo vệ chống ăn mòn cho vỏ của các tàu biển trọng tải lớn do có ưu điểm về hiệu quả bảo vệ cũng như tính kinh tế cao. Trong bài báo này, việc đánh giá tính chất vật liệu điện cực MMO và thiết kế, chế tạo, lắp đặt vận hành một hệ thống ICCP đã được nghiên cứu thực hiện. Độ bền của các vật liệu anôt MMO đã được nghiên cứu đánh giá bằng phương pháp phân cực dòng tĩnh tại các mật độ dòng điện và các nồng độ dung dịch khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ điện cực Ti/RuIrTiO₂ phù hợp sử dụng trong hệ ICCP ở mật độ dòng cao đến 600 A/m² trong môi trường nước biển (3,5% NaCl). Sử dụng hệ điện cực MMO này, hệ thống ICCP hoàn chỉnh bao gồm nguồn điện một chiều, điện cực anôt trơ và điện cực so sánh đã được Viện Khoa học Vật liệu thiết kế, chế tạo và lắp đặt bảo vệ chống ăn mòn cho tàu Minh Phú 99. Số liệu đo đạc kiểm tra điện thế cho thấy, điện thế vỏ tàu âm hơn nhiều so với giá trị -800 mV (giá trị điện thế bảo vệ theo các tiêu chuẩn bảo vệ catôt). Điều đó có nghĩa là hệ thống ICCP đã vận hành bảo vệ chống ăn mòn cho vỏ tàu rất hiệu quả.

Từ khóa: anôt trơ phủ hỗn hợp ôxit hiếm MMO, ăn mòn, bảo vệ catôt, điện thế bảo vệ, vỏ tàu.

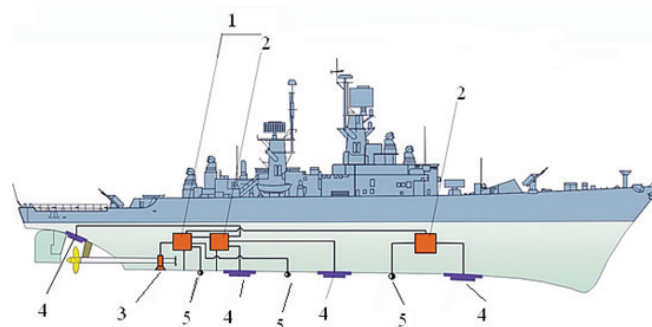
Chỉ số phân loại: 2.5

Mở đầu

Việt Nam là một quốc gia có đường bờ biển dài nên ngành công nghiệp vận tải biển được xác định có vai trò then chốt trong phát triển kinh tế. Cùng với sự phát triển của ngành đóng tàu, các nghiên cứu chống ăn mòn cho vỏ tàu cũng đã được quan tâm nhiều nhằm nâng cao tuổi thọ làm việc của tàu cũng như giảm giá thành vận tải để tăng tính cạnh tranh kinh tế. Bảo vệ catôt kết hợp với sơn phủ để chống ăn mòn vỏ tàu biển có hiệu quả rất cao trong môi trường biển và là công việc bắt buộc đã được Cục Đăng kiểm quy định. Thông thường, có hai phương pháp bảo vệ catôt là sử dụng anôt hy sinh (protectơ) và bằng dòng điện ngoài. Từ trước đến nay, phương pháp bảo vệ vỏ tàu biển thường được sử dụng anôt hy sinh do có ưu điểm đơn giản trong lắp đặt và theo dõi [1, 2].

Phương pháp bảo vệ catôt chống ăn mòn vỏ tàu biển bằng dòng điện ngoài ICCP mới được áp dụng nhiều trong những năm gần đây do có những tiến bộ về thiết bị cũng như vật liệu anôt trơ [3, 4]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là điện áp/dòng điện tại các điện cực được tự động điều chỉnh tùy thuộc vào tốc độ ăn mòn/xâm thực của các vùng biển khác nhau, tạo ra hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn thân vỏ tàu tối ưu nhất. Tuổi thọ và thời gian làm việc của các điện cực trong hệ thống chống ăn mòn dạng này được tính từ 10-30 năm (tùy điều kiện cụ

thể của vùng biển tàu hoạt động và tùy thuộc vào loại vật liệu anôt). Vì vậy, chu kỳ lên đà sửa chữa của tàu được kéo dài và sẽ giảm chi phí [4-6]. Hình 1 là sơ đồ nguyên lý của một hệ thống ICCP bảo vệ chống ăn mòn cho vỏ tàu biển. Hệ thống này bao gồm các bộ phận chính là nguồn điện một chiều, các điện cực anôt trơ và các điện cực so sánh. Khi hệ thống ICCP vận hành, cực âm của nguồn điện một chiều được nối với vỏ tàu và cực



Hình 1. Hệ thống chống ăn mòn dạng catôt dùng dòng điện ngoài điển hình: 1. Thiết bị điều khiển trung tâm; 2. Nguồn điện một chiều DC; 3. Thiết bị ngắt mạch giữa chân vịt và vỏ tàu theo cơ cấu tiếp xúc chổi than; 4. Các điện cực anôt; 5. Các điện cực so sánh.

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

Development of impressed current cathodic protection system for corrosion prevention of ship hull

Ngoc Phong Nguyen¹, Chi Linh Do^{1*},
Hong Hanh Pham¹, Quang Ngan Pham¹,
Xuan Ngoc Pham²

¹Institute of Materials Science,
Vietnam Academy of Science and Technology

²Naval Technical Institute

Received 1 August 2018; accepted 14 September 2018

Abstract:

Recently, impressed current cathodic protection (ICCP) using mixed metal oxides (MMO) has been widely applied for ship hull protection from corrosion in marine environment because of its high protection efficiency as well as high economic efficiency. In this paper, the characterization of MMO electrode materials as well as the design, fabrication, assembling, and operation of an ICCP system were reported. Stability of MMO anode was evaluated by the galvanostatic method at different current densities and concentrations of NaCl solution. The results showed that Ti/RuIrTiO₂ electrode system may be suitable to be used in ICCP system operating at high current density around 600 A/m² in marine environment (NaCl 3.5%). Using this electrode system, a full ICCP system, including an auto control rectifier, MMO anodes, and reference electrodes was designed, fabricated and operated by Institute of Materials Science to protect the hull of ship Minh Phu 99. The collected data showed that potential of ship hull was much more negative than -800 mV (protection potential value according to cathodic protection standards), which means this ICCP system has operated well for six months.

Keywords: cathodic protection, corrosion, mixed metallux oxide (MMO) anode, protection potential, ship hull.

Classification number: 2.5

đương nổi với điện cực anốt trơ. Khi dòng điện một chiều chạy qua hệ thống, vỏ tàu sẽ được phân cực catốt và khi đạt tới điện thế bảo vệ tiêu chuẩn -800 mV hoặc âm hơn, quá trình ăn mòn kim loại vỏ tàu hầu như không xảy ra [7, 8].

Vật liệu anốt là một trong những thành phần quan trọng nhất trong hệ thống thiết bị bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài. Tuổi thọ và thời gian làm việc của các điện cực trong hệ thống chống ăn mòn vỏ tàu được tính đến 20 năm (tùy điều kiện cụ thể của vùng biển tàu hoạt động và tùy thuộc vào loại vật liệu anốt). Những loại anốt đã được nghiên cứu và thường dùng hiện nay là platin và titan phủ hỗn hợp oxit kim loại MMO. Trong những năm gần đây, ở trong nước đã triển khai nghiên cứu điện cực anốt trơ MMO cho công nghiệp điện phân, còn đối với bảo vệ catốt chống ăn mòn cho vỏ tàu biển chưa được quan tâm nghiên cứu áp dụng [5, 9, 10].

Trong bài báo này, nghiên cứu phát triển một hệ thống ICCP bảo vệ chống ăn mòn cho vỏ tàu biển sẽ được giới thiệu. Các nghiên cứu chế tạo và đánh giá tính chất của các anốt trơ MMO được đề cập. Thiết kế, lắp đặt và vận hành hệ thống ICCP cho tàu Minh Phú 99 có tải trọng khoảng 5.000 tấn cũng sẽ được trình bày.

Thực nghiệm

Chế tạo điện cực anốt trơ MMO

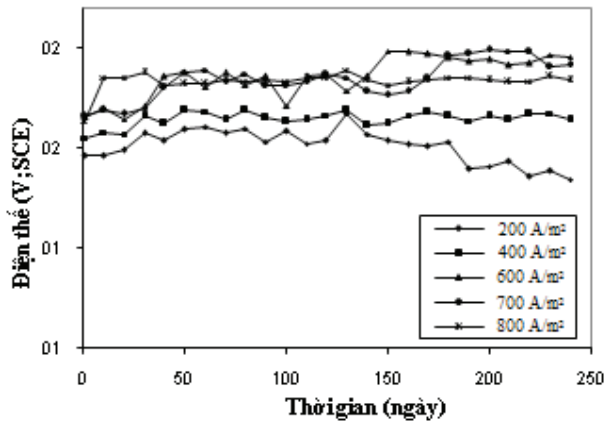
Anốt trơ hỗn hợp oxit MMO nền Ti được chế tạo bằng phương pháp phân hủy nhiệt. Dung dịch phủ lên bề mặt titan để tạo lớp phủ oxit được chuẩn bị từ các muối kim loại: clorua rutheni RuCl₃.xH₂O, clorua iridi IrCl₄.xH₂O và clorua titan TiCl₃. Ngoài ra còn dùng một số hoá chất khác trong quá trình chế tạo anốt như butanol, HCl... Thành phần dung dịch phủ và quy trình tạo lớp phủ oxit theo tài liệu [8]. Các điện cực anốt Ti/IrRuTiO₂ đã được nghiên cứu đánh giá tính chất bằng phương pháp phân cực dòng tĩnh từ thiết bị Model 2273 potentiostat/galvanostat ở các mật độ dòng anốt khác nhau từ 200 đến 800 A/m² và trong dung dịch NaCl có nồng độ từ 0,2 đến 3,5%.

Chế tạo hệ thống ICCP

Một hệ thống ICCP hoàn chỉnh bao gồm một nguồn điện một chiều, các anốt trơ và các điện cực so sánh đã được thiết kế chế tạo tại Viện Khoa học Vật liệu. Nguồn điện một chiều chế tạo có các thông số điện 24 V - 30 A có hệ thống tự động điều chỉnh điện áp và tích hợp hệ thống lưu trữ số liệu tự động. Các điện cực anốt trơ có dạng hình tròn với đường kính 20 cm. Lớp phủ oxit IrRuTiO₂ được chế tạo có chiều dày đảm bảo cho điện cực làm việc với tuổi thọ 20 năm. Các điện cực anốt được lắp đặt trong vỏ thép và được chống thấm nước bằng các gioăng cầu cao su. Mặt ngoài của bộ điện cực được bảo vệ tác động cơ học bằng một tấm nhựa HDPE có độ bền cơ học cao. Với thiết kế tương tự, điện cực so sánh kẽm đã được chế tạo sử dụng làm điện cực so sánh trong hệ thống ICCP. Hệ thống ICCP được lắp đặt bảo vệ cho tàu hàng Minh Phú 99 có tải trọng hàng khoảng 5.000 tấn được đóng mới và hạ thủy vào tháng 10/2017.

Kết quả và thảo luận

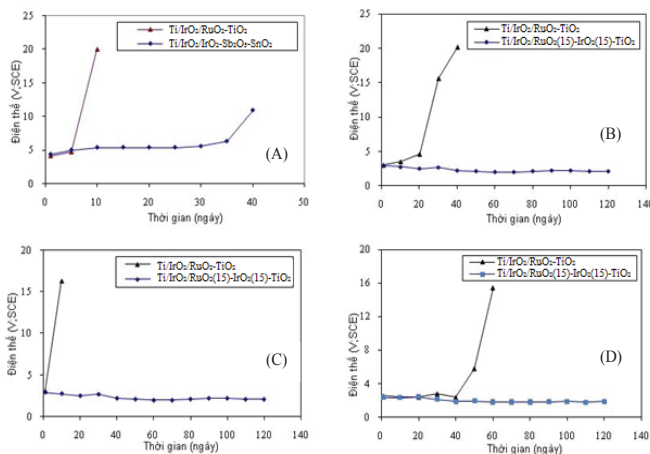
Đặc trưng tính chất của điện cực anốt trợ MMO



Hình 2. Điện thế của anốt $\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2\text{IrO}_2\text{TiO}_2$ trong dung dịch 3,5% NaCl ở các mật độ dòng khác nhau.

Hình 2 cho biết ảnh hưởng của mật độ dòng phân cực đến điện thế của anốt $\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2\text{IrO}_2\text{TiO}_2$ trong dung dịch 3,5% NaCl. Điện thế phân cực của anốt tăng khi mật độ dòng phân cực tăng. Sau khoảng 8 tháng thử nghiệm, điện thế phân cực vẫn ổn định kể cả với mật độ dòng cao 800 A/m^2 chứng tỏ các anốt đều có độ bền điện hóa cao, có thể ứng dụng trong bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài trong nước biển.

Kết quả trên hình 3 là ảnh hưởng của nồng độ NaCl đến điện thế của các anốt khi phân cực ở mật độ dòng 600 A/m^2 . Nồng độ NaCl càng thấp thì độ phân cực của anốt càng cao. Anốt $\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$ không bền điện hóa kể cả trong dung dịch có nồng độ NaCl cao đến 2%, sau một thời gian ngắn thử nghiệm điện thế anốt đã tăng cao, thời gian sống của anốt giảm theo nồng độ NaCl. Trong khi đó, điện thế của anốt $\text{Ti/IrO}_2/$



Hình 3. Điện thế theo thời gian của các anốt trong dung dịch (A) 0,2% NaCl; (B) 0,5% NaCl; (C) 0,8% NaCl và (D) 3,5% NaCl ở mật độ dòng phân cực $i=600 \text{ A/m}^2$.

$\text{RuO}_2\text{IrO}_2\text{TiO}_2$ vẫn ổn định sau 120 ngày thử nghiệm ở các dung dịch trên 0,5% NaCl. Sự có mặt của IrO_2 đã làm tăng độ bền của lớp phủ MMO. Như vậy, qua thử nghiệm đánh giá tính chất các điện cực MMO, điện cực anốt trợ $\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2\text{IrO}_2\text{TiO}_2$ là phù hợp nhất và được lựa chọn trong ứng dụng bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài ICCP ở mật độ dòng cao đến 600 A/m^2 trong môi trường nước biển (3,5% NaCl).

Thiết kế, chế tạo và lắp đặt vận hành hệ thống ICCP bảo vệ chống ăn mòn vỏ tàu biển

Một hệ thống ICCP hoàn chỉnh được nghiên cứu thiết kế bảo vệ chống ăn mòn cho tàu hàng Minh Phú 99 có tải trọng khoảng 5.000 tấn. Theo thiết kế, diện tích cần bảo vệ của vỏ tàu thay đổi trong khoảng 1.722 đến 2.580 m^2 phụ thuộc vào tải trọng hàng chất trên tàu.

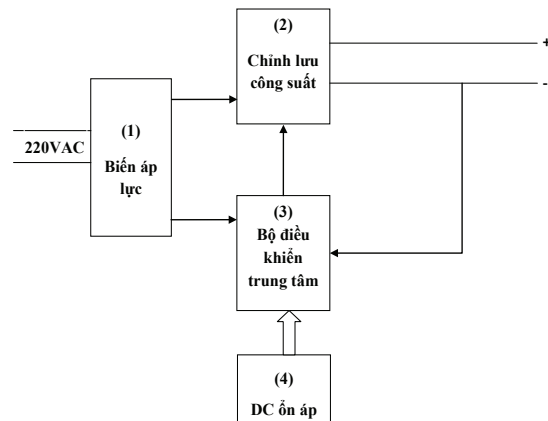
Trong hệ thống bảo vệ catốt ICCP, điện áp bảo vệ của vỏ tàu cần luôn duy trì âm hơn -800 mV để đảm bảo cho công trình không bị ăn mòn. Theo tiêu chuẩn về bảo vệ catốt, mật độ dòng điện bảo vệ cho công trình thép có sử dụng lớp sơn phủ làm việc trong môi trường biển khoảng 3 mA/m^2 trong giai đoạn đầu vận hành công trình. Theo thời gian làm việc, lớp sơn phủ bị hư hại dần nên sau 5 năm mật độ dòng điện bảo vệ có thể tăng lên đến 6 mA/m^2 . Do đó, để bảo vệ giai đoạn đầu cho vỏ tàu Minh Phú 99, dòng điện bảo vệ thay đổi trong khoảng:

$$I_{\min} = 0,003 \times 1.722 = 5,166 \text{ (A)}$$

$$\text{và } I_{\max} = 0,003 \times 2.580 = 7,740 \text{ (A)}$$

Giá trị dòng điện bảo vệ thay đổi là do sự thay đổi của vùng mớn nước vỏ tàu khi tải hàng thay đổi và sẽ thay đổi theo thời gian khi lớp sơn vỏ tàu bị hỏng dần. Trên cơ sở giá trị dòng điện bảo vệ tính toán được, một hệ ICCP đã được nghiên cứu phát triển bảo vệ chống ăn mòn cho tàu Minh Phú 99. Hệ thống này bao gồm nguồn điện một chiều, các điện cực anốt trợ và các điện cực so sánh.

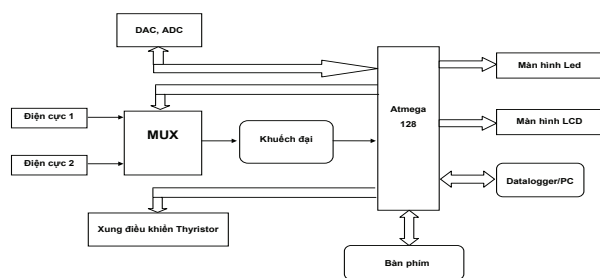
Thiết kế chế tạo nguồn điện tự động ổn định điện thế: do tàu vận tải chạy cả đường sông và đường biển có môi trường nước thay đổi từ nước ngọt sang nước mặn nên để có thể cung cấp



Hình 4. Sơ đồ khối của nguồn điện một chiều công suất $24 \text{ V} - 30 \text{ A}$ trong hệ thống ICCP.

đủ dòng điện bảo vệ vỏ tàu, nguồn điện một chiều 24 V - 30 A đã được nghiên cứu chế tạo và dòng điện sẽ được tự động điều chỉnh theo điện thế so sánh để phù hợp ứng dụng trong bảo vệ chống ăn mòn. Hình 4 là sơ đồ khối của bộ nguồn với các khối chức năng.

Trong các khối chức năng thì bộ phận điều khiển trung tâm có nhiệm vụ quan trọng nhất. Bộ phận này có vai trò điều khiển hoạt động của toàn bộ hệ thiết bị. Chức năng quan trọng nhất của nó là điều khiển điện áp nguồn sao cho điện áp của điện cực so sánh so với catốt phải bằng điện áp đặt trước. Ngoài ra nó còn có vai trò đo và lưu trữ số liệu, hiển thị các thông số trên màn hình LCD và màn hình LED. Hình 5 là sơ đồ nguyên lý vận hành của bộ điều khiển trung tâm sử dụng chip điều khiển Atmega 128.



Hình 5. Sơ đồ nguyên lý vận hành của bộ điều khiển trung tâm sử dụng chip điều khiển Atmega 128.

Với các cơ sở nguyên lý trên, chúng tôi đã thiết kế và chế tạo bộ nguồn điện có các thông số kỹ thuật như sau: dòng tối đa 30 A và điện áp tối đa 24 V, sai số giữa giá trị điện áp so sánh đặt trước và điện áp so sánh không chế được là ± 20 mV.

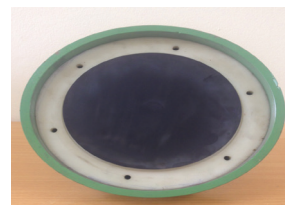
Bên cạnh khả năng điều khiển tự động, hệ thống nguồn cũng đã được nghiên cứu tích hợp phần mềm lưu trữ dữ liệu và kết nối máy tính. Theo đó số liệu được lưu trữ theo 2 kênh bao gồm giá trị điện thế và thời gian đo. Thiết bị được kết nối với máy tính qua cổng COM hoặc USB để xuất dữ liệu bởi một phần mềm chạy trên máy tính. Chúng tôi đã hoàn thiện việc xây dựng phần mềm máy tính được viết bằng chương trình Visual Basic để kết nối các bộ phận của hệ thống bảo vệ với giao diện như hình 6. Chương trình phần mềm có khả năng đặt các thông số điện thế bảo vệ và thời gian ghi số liệu. Ứng dụng này rất dễ sử dụng, chạy tích hợp trên các nền tảng win cao



Hình 6. Giao diện chương trình lưu trữ số liệu.

cấp và đặc biệt có thể nâng cấp phù hợp theo yêu cầu sử dụng.

Thiết kế và chế tạo các điện cực anốt trợ và các điện cực so sánh: vật liệu điện cực nền Ti phủ hỗn hợp oxit kim loại IrRuTiO₂ có độ bền cao đã được lựa chọn sử dụng trong hệ thống ICCP của tàu Minh Phú 99. Các điện cực anốt trợ có dạng hình tròn với đường kính 20 cm và mật độ dòng thiết kế là 600 A/m². Lớp phủ oxit IrRuTiO₂ được chế tạo có chiều dày đảm bảo cho điện cực làm việc với tuổi thọ 20 năm. Các điện cực anốt được lắp đặt trong vỏ thép và được chống thấm nước bằng các gioăng cầu cao su. Mặt ngoài của bộ điện cực được phủ bởi một tấm nhựa HDPE có độ bền cơ học cao. Với thiết kế tương tự, điện cực so sánh kẽm đã được chế tạo sử dụng làm điện cực so sánh trong hệ thống ICCP. Chi tiết cấu tạo của các loại điện cực này được trình bày trên các hình 7 và 8.

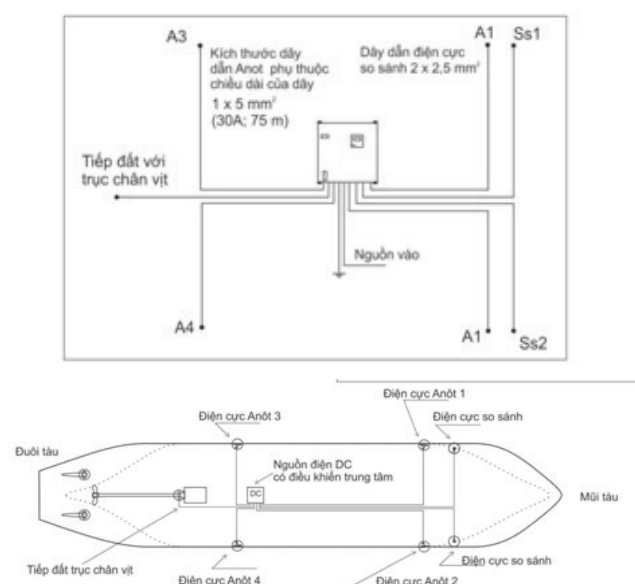


Hình 7. Hình ảnh điện cực anốt trợ Ti/IrRuTiO₂ chế tạo cho hệ thống ICCP.



Hình 8. Hình ảnh điện cực so sánh Zn chế tạo cho hệ thống ICCP.

Lắp đặt hệ thống ICCP trên tàu Minh Phú 99: sơ đồ hệ thống ICCP lắp đặt vận hành trên tàu Minh Phú 99 được trình bày trên hình 9. Hệ thống này bao gồm một nguồn điện, 4 điện cực anốt trợ và 2 điện cực so sánh. Bốn bộ điện cực anốt trợ được lắp đặt đối xứng gần đầu tàu và gần đuôi tàu để đảm bảo phân bố dòng điện bảo vệ đều khắp vỏ tàu. Trong khi đó, 2 điện cực so sánh Zn được lắp ở mũi tàu để theo dõi được điện thế



Hình 9. Sơ đồ thiết kế hệ thống ICCP của tàu Minh Phú 99.

bảo vệ cho cả hệ thống. Các quá trình lắp đặt hệ thống ICCP được minh họa trên các hình 10 và 11.



Hình 10. Lắp đặt điện cực anốt trên thân tàu Minh Phú 99.



Hình 11. Lắp đặt tấm chắn điện bằng vật liệu composit quanh anốt.

Đo đạc đánh giá và kiểm tra hệ thống ICCP: để theo dõi khả năng bảo vệ của hệ thống ICCP, điện thế của vỏ tàu được đo kiểm tra tại 9 vị trí quanh tàu như sơ đồ trên hình 12. Địa điểm khảo sát được thực hiện tại vùng biển Cẩm Phả nơi tàu Minh Phú vận chuyển than với mức nước 7 m vào ngày 10/11/2017. Bảng 1 biểu diễn ảnh hưởng của dòng điện bảo vệ đến giá trị điện thế bảo vệ của vỏ tàu. Nhìn chung, khi tăng dòng điện, điện thế vỏ tàu cũng âm hơn và đều đạt được trên tiêu chuẩn bảo vệ là âm hơn -800 mV; Ag/AgCl. Dựa trên các kết quả đã khảo sát, chế độ vận hành của thiết bị nguồn được lựa chọn là điện áp một chiều cố định tại giá trị 3,3 V và dòng điện tương ứng khoảng 2,8-3,0 A.



Hình 12. Sơ đồ các vị trí đo kiểm tra điện thế của vỏ tàu.

Bảng 1. Điện thế của vỏ tàu tại các giá trị dòng điện bảo vệ khác nhau.

I (A)	Điện thế vỏ tàu (mV; Ag/AgCl)								
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
1	-947	-975	-996	-996	-996	-994	-991	-977	-948
1,8	-962	-984	-1.005	-1.008	-1.003	-1.006	-1.011	-997	-967
2,4	-980	-993	-1.012	-1.016	-1.017	-1.014	-1.019	-1.010	-972
2,7	-994	-1.004	-1.021	-1.024	-1.025	-1.030	-1.027	-1.020	-977
3,4	-1.008	-1.015	-1.029	-1.032	-1.034	-1.039	-1.038	-1.031	-988
4	-1.018	-1.030	-1.043	-1.048	-1.045	-1.051	-1.053	-1.049	-992
4,8	-1.030	-1.042	-1.057	-1.060	-1.051	-1.062	-1.065	-1.064	-1.011

Bảng 2 là các giá trị điện thế vỏ tàu được lưu trữ trong suốt quá trình vận hành của tàu Minh Phú 99 từ ngày 14/1/2018 đến 15/5/2018. Các giá trị điện thế đo được đều cao hơn nhiều so với điện thế bảo vệ theo tiêu chuẩn (-800 mV; Ag/AgCl). Điều này đã thể hiện rằng hệ thống ICCP đã vận hành bảo vệ chống ăn mòn cho vỏ tàu rất hiệu quả.

Bảng 2. Các giá trị đo điện thế vỏ tàu Minh Phú 99 lưu trữ trong quá trình vận hành.

Giờ: phút	Ngày/tháng/năm	Uss1 (mV; Zn)	Uss2 (mV; Zn)	Uss1 (mV; Ag/AgCl)	Uss2 (mV; Ag/AgCl)
9:46	15/05/2018	101	103	-949	-947
9:46	30/04/2018	101	135	-949	-915
9:46	24/04/2018	101	133	-949	-917
11:12	31/03/2018	133	131	-917	-919
8:00	27/02/2018	92	90	-958	-960
8:39	14/01/2018	45	45	-1.005	-1.005

Kết luận

1) Đã nghiên cứu ảnh hưởng của mật độ dòng điện và nồng độ dung dịch NaCl đến độ bền của anốt tro hỗn hợp ôxít kim loại quý hiếm MMO. Điện cực anốt tro Ti/IrO₂/RuO₂/IrO₂/TiO₂ phù hợp nhất cho bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài ở mật độ dòng cao đến 600 A/m² trong môi trường nước biển (3,5% NaCl).

2) Một hệ thống bảo vệ catốt bằng dòng điện ngoài ICCP hoàn chỉnh bao gồm: một nguồn điện một chiều tự động điều khiển 30 V - 25 A tích hợp hệ thống lưu trữ số liệu, 04 điện cực anốt tro MMO và 02 điện cực so sánh Zn đã được thiết kế, chế tạo và lắp đặt bảo vệ vỏ tàu Minh Phú 99. Các số liệu đo đạc cho thấy hệ thống đã vận hành bảo vệ tốt cho vỏ tàu sau khoảng nửa năm hoạt động.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hoàn thành với sự hỗ trợ kinh phí của đề tài VAST.NĐP.02/14-15. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Lazzari, P. Pedferri (2006), *Cathodic Protection*, 1st Edition.
- [2] Cathodic protection company limited, *Cathodic protection*, www.cathodic.co.uk.
- [3] MG Duff International Ltd., *Automatic systems for ships hulls*.
- [4] L. Xu (2011), “Impressed current anode for ship hull protection”, *Materials Performance*, **5(6)**, pp.40-42.
- [5] D.H. Kroon, L.M. Ernes (2007), “MMO coated titanium anodes for cathodic protection - Part I”, *Materials Performance*, **45(5)**, pp.26-29.
- [6] V.V. Panic and B.Z. Nikolic (2007), “Sol-gel prepared active ternary oxide coating on titanium in cathodic protection”, *J. Serb. Chem. Soc.*, **72**, pp.1393-1402.
- [7] TCVN 6051:1995, Hệ bảo vệ catốt - Yêu cầu thiết kế, lắp đặt và kiểm tra.
- [8] Corrosion protection of ships (2017), <http://www.dnvg1.com>.
- [9] Nguyễn Ngọc Phong, Đỗ Chí Linh, Phạm Hồng Hạnh, Ngô Ánh Tuyết (2009), “Ôxy hoá điện hoá của phenol trên điện cực tro Ti/RuO₂/IrO₂/TiO₂ trong môi trường kiềm”, *Tạp chí Hóa học*, **47**, tr.226-229.
- [10] Nguyễn Ngọc Phong (2003), “Nghiên cứu chế tạo điện cực anốt tro titan phủ hỗn hợp ôxít kim loại”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, **41**, tr.30-35.