

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CẢM BIẾN ĐIỆN HÓA GALVANIC GIÁM SÁT TRẠNG THÁI ĂN MÒN CỐT THÉP TRONG MÔI TRƯỜNG XÂM THỰC BỞI ION CLORUA

CAO NHẬT LINH ⁽¹⁾, SHEVTSOV D. S. ⁽²⁾, NGUYỄN VĂN CHI ⁽¹⁾,
NÔNG QUỐC QUẢNG ⁽¹⁾, LÊ HỒNG QUÂN ⁽¹⁾, ĐỒNG VĂN KIÊN ⁽¹⁾

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự bền vững của các cấu trúc bê tông cốt thép (BTCT) đóng vai trò hết sức quan trọng đối với nền kinh tế quốc gia cũng như các công trình quốc phòng. Trong thực tế, dưới tác động của môi trường, đặc biệt là môi trường biển, tuổi thọ của công trình BTCT bị suy giảm đáng kể do ảnh hưởng của hiện tượng ăn mòn cốt thép với sự xâm thực của ion clorua [1, 2]. Sự xâm thực của Cl⁻ đến bề mặt cốt thép làm giảm độ pH, phá hủy lớp bảo vệ dẫn đến hiện tượng ăn mòn điểm (pitting) cốt thép. Ăn mòn cốt thép trong bê tông diễn ra theo cơ chế điện hóa với phản ứng oxy hóa Fe ở anot và khử oxy hòa tan ở catot (phản ứng 1-2). Ăn mòn cốt thép về lâu dài dẫn đến sự suy giảm khả năng chịu lực của công trình, phá vỡ cấu trúc bê tông do tích tụ sản phẩm ăn mòn và cuối cùng có thể sụp đổ của cả công trình [3, 4].



Hiện nay, các chiến lược hiện đại quản lý chất lượng công trình BTCT tập trung vào việc xác định sự chuyển tiếp của trạng thái cốt thép từ thụ động sang hoạt hóa ở giai đoạn sớm, khi sự phá hủy lớp bảo vệ còn chưa lớn, bằng các phương pháp giám sát không phá hủy như: phương pháp đo điện thế half-cell [5], phương pháp đo điện trở suất bê tông [6], phương pháp đo dòng ăn mòn bằng cảm biến [7],... Ở thời điểm này, chi phí tiến hành sửa chữa còn thấp và tuổi thọ của công trình được nâng lên đáng kể. Trong đó, phương pháp đo dòng ăn mòn bằng cảm biến mô phỏng hệ pin galvanic được chú ý đặc biệt do các ưu điểm như: độ nhạy cao, chi phí thấp, dễ lắp đặt và sử dụng, tuổi thọ cao,... [8]

Trong công trình [9], các tác giả chế tạo cảm biến galvanic từ các tấm kim loại giống nhau với kích thước bé đặt trong môi trường cách điện. Đây là hệ cảm biến galvanic loại I. Các tấm kim loại này được chia thành 2 nhóm và được kết nối song song với nhau. Giữa 2 nhóm kim loại được kích hoạt bởi hiệu điện thế 0,05-0,20 V từ nguồn ngoài. Từ đây, chúng đóng vai trò như là một anot và catot. Khi môi trường xâm thực tiếp xúc với bề mặt cảm biến, trong hệ sẽ xuất hiện dòng điện. Giá trị của dòng điện phụ thuộc vào độ dẫn điện của môi trường, điện trở phân cực trên các vùng anot và catot, cũng như điện trở ngoài của ampe kế.

Trong công trình [10, 11], các tác giả chế tạo các cảm biến galvanic loại II. Hệ cảm biến này được cấu tạo từ những anot thép cacbon thấp sắp xếp với các khoảng cách khác nhau tính từ bề mặt bê tông. Trong vai trò catot sử dụng thép không gỉ hoặc titan, catot sắp xếp ngay gần các anot. Khi kết nối các anot với catot sẽ xuất hiện dòng điện. Khi thép cacbon thấp nằm ở trạng thái thụ động, dòng galvanic

không lớn, có thể bỏ qua. Khi xảy ra sự xâm thực của ion Cl^- hoặc quá trình cacbonat hóa chạm đến anot đầu tiên, thép cacbon sẽ chuyển sang trạng thái hoạt động và dòng điện sẽ tăng lên. Anot được đặt càng sâu trong bê tông, thời gian hoạt hóa chúng càng kéo dài. Hệ đo cho phép theo dõi được sự dịch chuyển của quá trình ăn mòn từ bề mặt bê tông. Các hệ cảm biến galvanic trên mang một số nhược điểm như: cần dòng điện kích hoạt từ bên ngoài; một số cảm biến có điện cực so sánh lắp trực tiếp vào trong bê tông không đảm bảo tuổi thọ làm việc cao; độ nhạy thấp, đặc biệt khi được lắp trong các cấu trúc ở môi trường hiếm oxy; tốc độ ăn mòn được đo từ cảm biến đôi khi không phản ánh đúng trạng thái ăn mòn của cốt thép...

Trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành chế tạo cảm biến điện hóa galvanic có diện tích điện cực làm việc nhỏ với độ nhạy cao nhằm xác định trạng thái ăn mòn của cốt thép trong môi trường xâm thực của ion clorua và trình bày kết quả ứng dụng bước đầu trong môi trường nước chiết bê tông nhằm xác định các tính chất điện hóa của cảm biến.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hóa chất, vật liệu

Hóa chất: NaCl 99% (Trung Quốc), epoxy ЭД-20 và chất đóng rắn ПЭПА (Liên bang Nga).

Nghiên cứu sử dụng mẫu cốt thép xây dựng để đánh giá hiện tượng ăn mòn cốt thép trong môi trường xâm thực của ion clorua, mẫu thép cacbon làm anot và đồng nguyên chất (mác M1 theo GOST 859-2001 Liên bang Nga với thành phần Cu đến 99,90%) làm catot cho cảm biến điện hóa. Thành phần các mẫu thép trên được xác định bằng phương pháp phổ phát xạ nguyên tử trên thiết bị ARL-3460, như sau:

- Cốt thép xây dựng Pomina, thành phần %: C - 0,257; Mn - 0,452; Si - 0,166; P - 0,014; S - 0,033; Ni - 0,135; Cr - 0,029; Cu - 0,321; Mo - 0,006; Al - 0,022; W - 0,004; Sn - 0,037; Co - 0,009; Fe - còn lại;

- Thép cacbon (anot cảm biến), thành phần %: C - 0,284; Mn - 0,682; Si - 0,196; P - 0,011; S - 0,025; Ni - 0,396; Cr - 0,065; Cu - 0,194; Mo - 0,016; V - 0,003; Al - 0,003; Nb - 0,002; W - 0,007; Sn - 0,017; Co - 0,008; Pb - 0,230; Zn - 0,074; Fe - còn lại.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

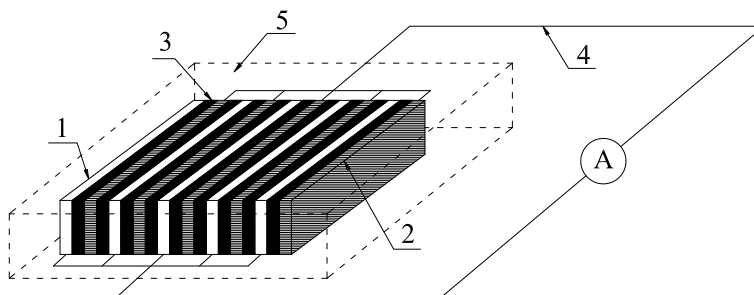
Để chuẩn bị nước chiết tiến hành đúc các mẫu bê tông theo tỷ lệ khối lượng: xi măng - 1, cát - 3, nước - 0,5. Sau thời gian đông rắn, các mẫu được phơi khô ngoài không khí và đem đi nghiền nhỏ, sàng qua rây với kích thước lỗ 0,2 mm. Mẫu thu được đem sấy ở 105°C đến khối lượng không đổi, sau đó đem ngâm trong nước cất với tỷ lệ khối lượng 5:1 trong 24 giờ ở nhiệt độ phòng. Sau cùng, hỗn hợp được mang đi lọc để thu được dung dịch dành cho nghiên cứu. pH của nước chiết nằm trong khoảng 12 - 13, đo bằng thiết bị đo pH Hanna HI 8314. Sau đó tiến hành chuẩn bị các dung dịch thử nghiệm từ nước chiết bê tông chứa các nồng độ ion clorua khác nhau từ 0 đến 1 M [12].

Các phép đo điện hóa được thực hiện trên thiết bị Autolab PGSTAT 204N. Hệ đo 3 điện cực: điện cực đối - tấm platin 8×8 mm, điện cực so sánh - Ag/AgCl trong KCl bão hòa và điện cực làm việc - mẫu cốt thép với diện tích $5,0 \text{ cm}^2$. Các thông số điện hóa được xác định bằng phần mềm Nova đồng bộ với thiết bị. Đường cong phân cực nhánh anot được quét theo chế độ thế động (potentiodynamic) với bước quét 1 mV từ OCP về phía điện thế dương đến thời điểm mật độ dòng tăng đột ngột.

Trong nghiên cứu này, tốc độ ăn mòn cốt thép được đánh giá theo phương pháp điện trở phân cực tuyến tính (phương pháp Mansfeld) [13]. Để xác định dòng ăn mòn bằng phương pháp điện trở phân cực tiến hành quét đường cong phân cực theo chế độ thế động xung quanh $\text{OCP} \pm 30 \text{ mV}$ với bước quét nhỏ $0,1 \text{ mV}$.

2.3. Chế tạo cảm biến điện hóa

Các cảm biến điện hóa được chế tạo từ các tấm kim loại (thép cacbon thấp và đồng) với chiều dày từ $100 - 250 \mu\text{m}$, đặt trong môi trường cách điện. Các tổ hợp tấm kim loại được kết nối với nhau để tạo thành các cặp pin galvanic, có khả năng kích hoạt dòng điện khi hệ tiếp xúc với môi trường điện li. Giá trị của dòng điện được xác định bởi động học của các quá trình anot và catot. Kích thước các chiều của cảm biến là $75 \times 25 \times 20 \text{ mm}$. Diện tích bề mặt làm việc của anot cảm biến là $1,25 \text{ cm}^2$. Sơ đồ cảm biến được trình bày trên hình 1. Cảm biến hoạt động dựa trên phương pháp đo trực tiếp dòng ăn mòn điện hóa từ hệ pin galvanic trên các điện cực của cảm biến khi nối các dây dẫn với một ampe kế có điện trở rất nhỏ.



Hình 1. Sơ đồ cảm biến điện hóa: 1 - Điện cực catot, 2 - Điện cực anot, 3 - Lớp cách điện, 4 - Mạch điện, 5 - Lớp vỏ cảm biến

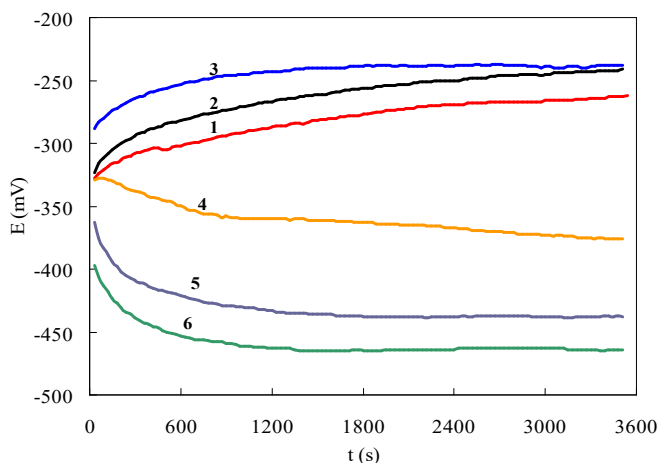
Để xác định mức độ biến đổi cấu trúc của vật liệu polyme dùng làm lớp vỏ cảm biến điện hóa tiến hành đo phổ FTIR trên thiết bị Bruker Tensor 27 trong khoảng $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Và dòng ăn mòn của cảm biến được đo trực tiếp bằng chức năng microampe kế trên đồng hồ Fluke 15B+ có khả năng hiển thị đến $0,1 \mu\text{A}$.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Hiện tượng ăn mòn cốt thép trong dung dịch nước chiết bê tông chứa ion clorua

Biến thiên thế mạch hở (OCP) của cốt thép trong nước chiết bê tông với nồng độ ion clorua khác nhau được thể hiện trên hình 2. Kết quả cho thấy, các giá trị điện

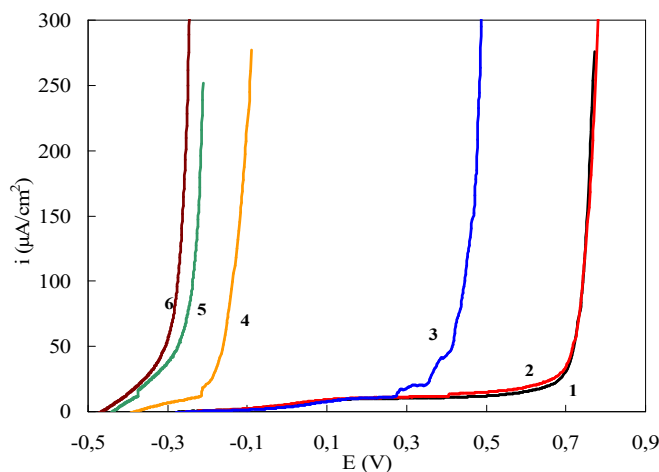
thế OCP biến thiên và đạt giá trị ổn định sau khoảng 1 giờ thử nghiệm. Các giá trị OCP dịch chuyển về phía điện thế âm hơn khi tăng nồng độ Cl^- . Trong các dung dịch không có hoặc có nồng độ ion clorua thấp (0,001 M và 0,01 M), OCP cốt thép tăng theo thời gian, chứng tỏ cốt thép rơi vào trạng thái thụ động với sự hình thành lớp màng bảo vệ trên bề mặt. Với dung dịch chứa từ 0,1 M Cl^- OCP cốt thép có xu hướng giảm theo thời gian. Độ lệch ΔE giữa dung dịch không có Cl^- và có 1 M Cl^- là 202 mV. Trên bề mặt cốt thép ngâm trong các dung dịch chứa 0,5 M và 1 M Cl^- có thể quan sát sự hình thành các vết ăn mòn bằng mắt thường sau thời gian thử nghiệm.



Hình 2. Xu hướng biến đổi OCP của cốt thép trong dung dịch nước chiết bê tông với nồng độ Cl^- : 1 - 0 M; 2 - 0,001 M; 3 - 0,01 M; 4 - 0,1 M; 5 - 0,5 M; 6 - 1 M

Đường cong phân cực nhánh anot của cốt thép ngâm trong dung dịch nước chiết bê tông được thể hiện trên hình 3. Khi tăng nồng độ ion clorua nhánh anot dịch chuyển về phía điện thế âm hơn và đường cong nhanh dốc đứng hơn. Và khi tăng nồng độ Cl^- điện thế hoạt hóa (giá trị điện thế trên đường cong phân cực mà ở đó dòng ăn mòn tăng đột biến) có xu hướng tiến gần về phía OCP và bề mặt cốt thép hình thành các pitting. Trong các dung dịch không có hoặc có nồng độ Cl^- thấp hiện tượng dòng anot tăng đột ngột ở điện thế >700 mV gây ra chủ yếu bởi hiện tượng tách oxy từ nước [14]. Đối với dung dịch không có ion clorua vùng thế thụ động kéo dài từ -262 đến 721 mV. Đối với dung dịch chứa 1 M Cl^- gần như không tồn tại vùng thế thụ động, cốt thép bị ăn mòn liên tục.

Tốc độ ăn mòn cốt thép được đánh giá theo phương pháp điện trở phân cực tuyến tính và được trình bày ở bảng 1. Đối chiếu với tiêu chuẩn đánh giá [15] cho thấy, trong dung dịch không có hoặc có 0,001 M Cl^- cốt thép bị thụ động hóa. Còn trong dung dịch 0,01 M Cl^- cốt thép bị ăn mòn thấp, đối với dung dịch chứa từ 0,1 M Cl^- cốt thép bị ăn mòn cao. Trong đó, với dung dịch 1 M Cl^- tốc độ ăn mòn cốt thép đạt $4,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Đây là giá trị rất nguy hại cho công trình, đặc biệt khi ăn mòn pitting chỉ tập trung phá hủy một số điểm nhất định, làm suy giảm nhanh chóng tiết diện ngang của cốt thép. Giá trị điện trở phân cực giảm tuyến tính với nồng độ ion clorua trong dung dịch.



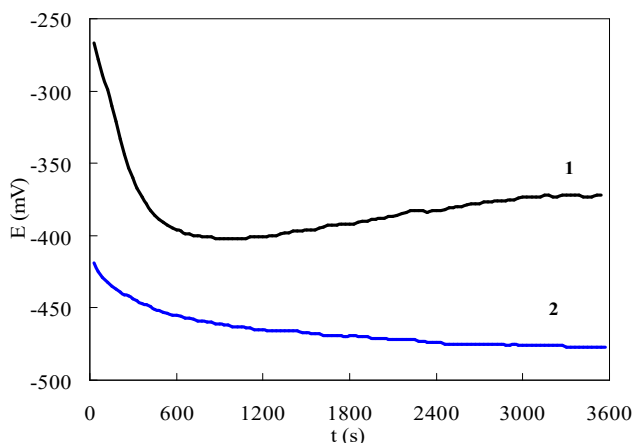
Hình 3. Đường cong phân cực anốt của cốt thép trong dung dịch nước chiết bê tông với nồng độ Cl^- : 1 - 0 M; 2 - 0,001 M; 3 - 0,01 M; 4 - 0,1 M; 5 - 0,5 M; 6 - 1 M

Bảng 1. Các thông số điện hóa của cốt thép trong dung dịch nước chiết bê tông theo phương pháp điện trở phân cực tuyến tính

Cl^-, M	$E_{\text{cor}}, \text{mV}$	b_a, mV	b_c, mV	B, mV	$R_p, \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$	$i_{\text{cor}}, \mu\text{A}/\text{cm}^2$
0	-262	58,2	47,4	11,4	128,9	0,09
0,001	-241	152,2	93,3	25,5	110,8	0,22
0,01	-238	216,0	155,8	39,3	116,6	0,34
0,1	-376	196,5	144,1	36,1	20,5	1,76
0,5	-438	88,9	117,7	22,0	15,4	1,43
1	-464	197,2	248,1	47,8	10,5	4,53

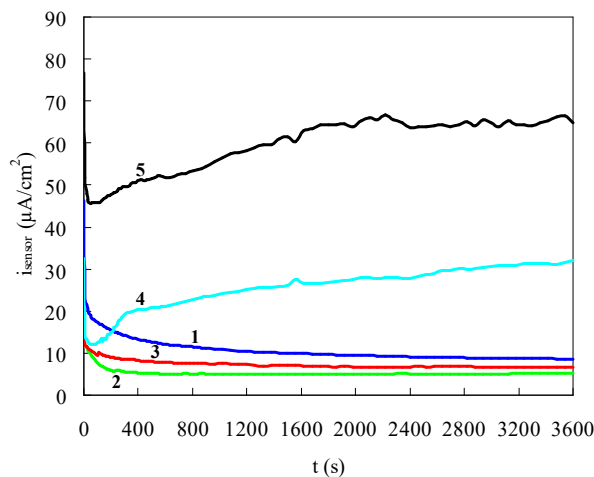
3.2. Sử dụng cảm biến điện hóa galvanic giám sát trạng thái ăn mòn của cốt thép trong môi trường có ion clorua

Kết quả thử nghiệm đo điện thế OCP của cảm biến galvanic khi đóng mạch trong môi trường nước chiết bê tông không có và có 1 M Cl^- được trình bày trên hình 4. Kết quả phân tích hình 4 cho thấy, khi trong dung dịch có chứa một lượng lớn ion Cl^- OCP của cảm biến dịch chuyển về phía điện thế âm trong suốt thời gian thử nghiệm và không có xu hướng đạt trạng thái cân bằng. Đối với dung dịch không chứa Cl^- OCP trong khoảng 10 phút đầu giảm, sau đó tăng dần đến giá trị ổn định. Kết quả đo riêng cho thấy, OCP của đồng M1 trong môi trường nước chiết bê tông chứa ion Cl^- 0-1 M ổn định ở giá trị $-182 \pm 10 \text{ mV}$. Phân tích kết hợp với hình 1 cho thấy, trong dung dịch không chứa Cl^- trong khoảng thời gian đầu quá trình ăn mòn xảy ra theo cơ chế kiểm soát catot và sau đó chuyển sang cơ chế kiểm soát anốt. Đối với dung dịch chứa 1 M Cl^- quá trình ăn mòn xảy ra xuyên suốt theo cơ chế kiểm soát catot với phản ứng khử oxy hòa tan.



Hình 4. Xu hướng biến đổi OCP của cảm biến trong dung dịch nước chiết bê tông không có (1) và có 1 M Cl^- (2)

Kết quả thử nghiệm đo dòng ăn mòn bằng cảm biến galvanic trong môi trường nước chiết bê tông với sự có mặt của ion clorua được trình bày trên hình 5. Kết quả cho thấy, đối với các dung dịch chứa ion clorua không lớn hơn 0,01 M mật độ dòng ăn mòn trên cảm biến lúc bắt đầu đóng mạch đạt giá trị cực đại, sau đó giảm dần. Mật độ dòng ăn mòn đạt giá trị ổn định sau khoảng 10 phút thử nghiệm và không vượt quá $10,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Giá trị này phản ánh trạng thái thụ động của anốt cảm biến.



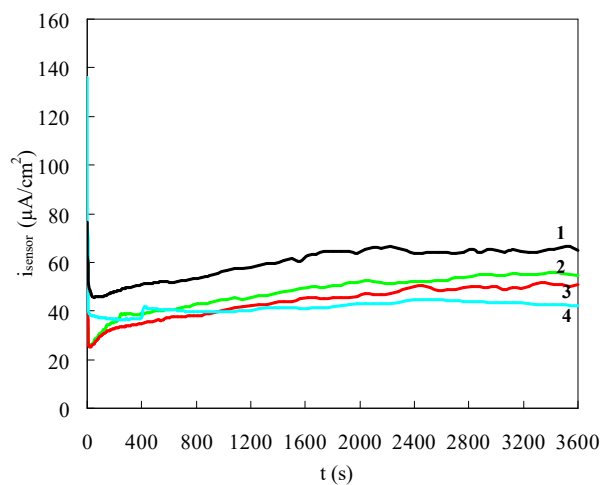
Hình 5. Dòng ăn mòn đo bằng cảm biến trong dung dịch nước chiết bê tông với nồng độ Cl^- : 1 - 0 M; 2 - 0,001 M; 3 - 0,01 M; 4 - 0,1 M; 5 - 1 M

Với dung dịch chứa 0,1 M Cl^- mật độ dòng cảm biến giảm từ vị trí đóng mạch đến giá trị cực tiểu $12,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ sau 1 phút thử nghiệm, sau đó tăng dần trở lại và đạt giá trị $32,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ sau 60 phút. Đối với dung dịch chứa 1 M Cl^- mật độ dòng cảm biến sau 50 giây giảm đến giá trị min $45,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ và sau đó tăng dần với độ nhiễu lớn hơn và không có xu hướng đạt đến giá trị cân bằng trong suốt thời gian

thử nghiệm. Giá trị cân bằng của cảm biến trong dung dịch không chứa ion clorua là $8,6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, nhỏ hơn lần lượt là 1,4 và 5,3 lần so với các giá trị dòng cực tiểu của sensor trong các dung dịch chứa 0,1 và 1 M Cl^- . Như vậy, qua phân tích cho thấy, khi tăng nồng độ ion clorua giá trị cực tiểu của mật độ dòng ăn mòn cảm biến tăng và đối với dung dịch có từ 0,1 M Cl^- dòng ăn mòn tăng theo thời gian, không có xu hướng đạt giá trị cân bằng.

Trong thực tế, tùy theo các cấu trúc BTCT khác nhau mà khoảng cách từ vị trí đặt cốt thép đến bề mặt bê tông bị xâm thực cũng thay đổi. Điều này dẫn đến sự thay đổi của nồng độ oxy hòa tan ở bề mặt cốt thép, yếu tố tham gia vào quá trình ăn mòn theo phản ứng (2). Chính vì thế, tác giả tiến hành đánh giá ảnh hưởng của độ sâu đặt cảm biến trong nước chiết bê tông đến dòng ăn mòn đo bằng sensor. Kết quả được trình bày ở hình 6 cho thấy, khi tăng chiều dày lớp dung dịch (Δl) trên cảm biến dòng ăn mòn có xu hướng giảm đi. Cụ thể, khi tăng Δl lần lượt 2; 4 và 8 lần thì giá trị mật độ dòng cảm biến sau 60 phút thử nghiệm lần lượt giảm 1,2; 1,3 và 1,5 lần. Ngoài ra, giá trị cực tiểu trên các đường cong mật độ dòng thay đổi không theo quy luật khi tăng Δl . Điều này có thể do thời gian đạt giá trị cực tiểu ngắn nên ảnh hưởng của nồng độ oxy chưa rõ rệt.

Điều này cho thấy, trong môi trường xâm thực khi giảm chiều dày của lớp bê tông bảo vệ cốt thép sẽ dễ bị ăn mòn hơn. Và, ngoài yếu tố nồng độ ion clorua xâm thực đến bề mặt cốt thép, nồng độ oxy hòa tan cũng ảnh hưởng không nhỏ đến tốc độ ăn mòn và phá hủy cốt thép. Chính vì thế, thông thường các cấu trúc BTCT trong vùng nước biển lên xuống hay té sóng bị ăn mòn mạnh hơn cấu trúc bị ngập hoàn toàn trong nước biển [2].



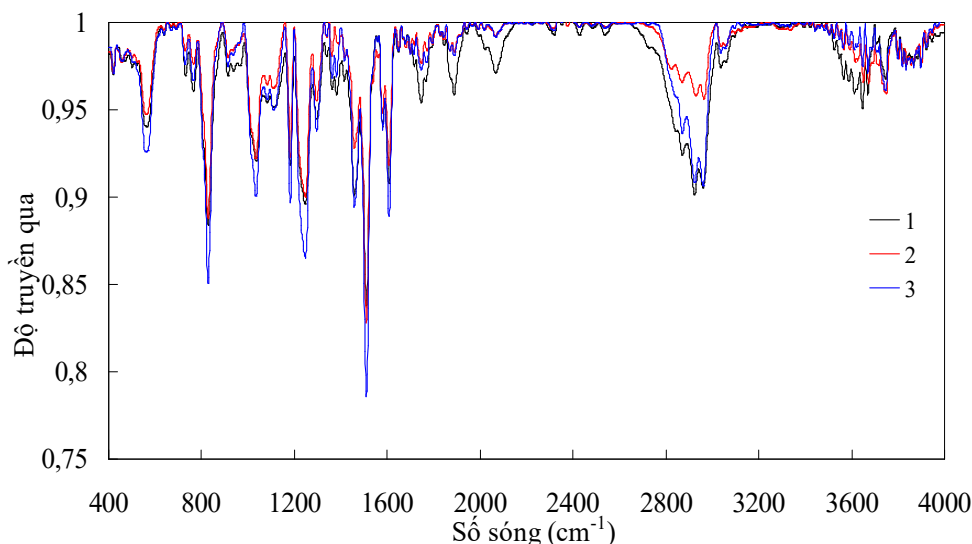
Hình 6. Dòng ăn mòn đo bằng cảm biến trong dung dịch nước chiết bê tông chứa 1 M Cl^- với các độ sâu khác nhau: (1) 0,5 cm; (2) 1 cm; (3) 2 cm; (4) 4 cm

Hình 7 cho thấy dòng ăn mòn trên cảm biến có thể được kiểm tra nhanh và đơn giản bằng đồng hồ đa năng có chức năng microampe kế. Bề mặt của cảm biến sau khi làm việc trong môi trường xâm thực bởi ion Cl^- xuất hiện pitting ăn mòn.



Hình 7. Ảnh đo dòng ăn mòn trên cảm biến (a) và pitting xuất hiện trên bề mặt cảm biến sau thời gian thử nghiệm (b)

Nước chiết bê tông hay bê tông nói chung là môi trường có độ pH cao, dễ gây biến đổi, phá hủy nhiều loại vật liệu polyme [16]. Chính vì thế, để đánh giá độ bền của vật liệu làm lớp vỏ cảm biến tiến hành đo phổ FTIR của mẫu trước và sau 1 tháng ngâm trong nước chiết bê tông, cũng như sau 1 năm làm việc trong cấu trúc bê tông ở môi trường nước biển lên xuống. Kết quả được trình bày trên hình 8 cho thấy, các phổ có vị trí các pic tương đối đồng nhất. Các đỉnh pic đặc trưng đều dao động quanh các giá trị gần nhau, như: pic tại số sóng 829 cm^{-1} và 1240 cm^{-1} đặc trưng cho dao động của liên kết C-O; 930 cm^{-1} - $\text{CH}_2\text{-O-CH}$; 1033 cm^{-1} - C-O-C; 1362 cm^{-1} - CH_2 ; 1510 cm^{-1} - C-C (vòng benzen); 1607 cm^{-1} - C=C (vòng benzen); 2924 cm^{-1} - CH_2 ; 3048 cm^{-1} - CH. Có thể kết luận rằng, vật liệu chế tạo vỏ cảm biến ít bị biến đổi khi làm việc trong môi trường nước chiết bê tông và bê tông trong môi trường biển.



Hình 8. Phổ FTIR của vật liệu chế tạo lớp vỏ sensor trước (1), sau thử nghiệm trong nước chiết bê tông (2) và bê tông trong môi trường nước biển (3)

4. KẾT LUẬN

- Trong môi trường nước chiết bê tông với sự có mặt của ion clorua cốt thép bị ăn mòn pitting. Khi tăng nồng độ ion clorua điện thế hoạt hóa dịch chuyển về phía OCP, vùng thể thụ động trên đường cong phân cực anot bị thu hẹp. Với dung dịch 1 M Cl⁻ tốc độ ăn mòn cốt thép lên đến 4,53 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

- Đã chế tạo thành công cảm biến điện hóa galvanic với điện cực anot thép cacbon và điện cực catot đồng. Trong môi trường không có hoặc có nồng độ Cl⁻ thấp, mà ở đó cốt thép bị thụ động hóa, mật độ dòng ăn mòn trên cảm biến không vượt quá 10,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Khi dung dịch chứa một lượng lớn ion clorua quá trình ăn mòn trên cảm biến diễn ra theo cơ chế kiểm soát catot. Kết quả này sẽ là tiền đề quan trọng để tiến hành các nghiên cứu lắp đặt cảm biến vào các cấu trúc bê tông trong môi trường xâm thực bởi ion clorua ngoài thực tế để cảnh báo hiện tượng ăn mòn cốt thép ở giai đoạn sớm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Phạm Văn Khoan, Nguyễn Nam Thắng, Nguyễn Đăng Khoa, Trần Nam, *Một số kinh nghiệm thiết kế và thi công sửa chữa kết cấu công trình bê tông cốt thép bị hư hỏng do tác động ăn mòn của môi trường biển Việt Nam*, Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ hai về Sự cố và hư hỏng công trình xây dựng, Hà Nội, ngày 16/12/2003.
2. Cao Nhật Linh, Nguyễn Văn Chi, Đông Văn Kiên, Lê Hồng Quan, Nông Quốc Quang, Nguyễn Đức Anh, Nguyễn Thị Hồng Xanh, Zyablov A. N., *Evaluation of chloride corrosion in the survey of a reinforced concrete structure in Nha Trang Bay (Vietnam)*, Butlerov Communications, 2021, **67**(8):74-78.
3. Bikul'Chus G., *Chloride removal from reinforced concrete and relevant loss of strength*, Protection of metals, 2005, **41**(5):484-486.
4. Bertolini L., Elsener B., Pedersen P., Redaelli E., Polder R., *Corrosion of steel in concrete*, Weinheim, Germany: Wiley-Vch, 2013, 414 pp.
5. ASTM C876, *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*.
6. AASHTO T358, *Method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*.
7. Pereira E. V., Figueira R. B., Salta M. M. L., Fonseca I. T. E. D., *A galvanic sensor for monitoring the corrosion condition of the concrete reinforcing steel: Relationship between the galvanic and the corrosion currents*, Sensors, 2009, **9**(11):8391-8398.
8. Shevtsov D. S., Zartsyn I. D., Komarova E. S., *Relation between resistivity of concrete and corrosion rate of reinforcing bars caused by galvanic cells in the presence of chloride*, Cement and Concrete Composites, 2021, **119**:104026.
9. Tuutti K., *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 468 pp.

10. Liu H., Zhang B., Liu H., Ji Z., *Analysis of long-term durability monitoring data of high-piled wharf with anode-ladder sensors embedded in concrete*, Frontiers in Materials, 2021, **8**:703347.
11. Raupach M., Schiessl P., *Macrocell sensor system for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures*, NDT&E International, 2001, **34**(6):435-442.
12. Као Ньят Линь, Нгуен Ван Чи, Нонг Куок Куанг, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Зяблов А.Н., Миненкова И.В., *Обнаружение ионов хлора на поверхности арматурных сталей после контакта с модельной средой методом масс-спектрометрии*, Изв. вузов. Химия и хим. технология., 2022, **65**(6):6-11.
13. Mansfeld F. *The polarization resistance technique for measuring corrosion currents*, Advances in corrosion science and technology, Springer, Boston, MA, 1976, p. 163-262.
14. Старовойтова Е.В., Андреев Н.Н., Гедвилло И.А., Жмакина А.С., *Об использовании ПАВ при создании мигрирующих ингибиторов коррозии*. Коррозия: материалы, защита, 2008, **10**:22-25.
15. Song H. W., Saraswathy V. *Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A Review*, Int. J. Electrochem. Sci, 2007, **2**(1):1-28.
16. Prakki A., Cilli R., Mondelli R. F. L., Kalachandra S., Pereira J. C., *Influence of pH environment on polymer based dental material properties*, Journal of dentistry, 2005, **33**(2):91-98.

SUMMARY

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF GALVANIC ELECTROCHEMICAL SENSORS FOR MONITORING THE CORROSION STATE OF STEEL REBAR IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS CONTAINING CHLORIDE IONS

This paper presents the results of a study on the corrosion of steel reinforcement in concrete pore solutions contaminated with chloride ions. With increasing chloride concentration, the open-circuit potential and the anodic polarization curve shift towards more negative potential values, the passive potential region of the anodic polarization curve decreases. The corrosion rate of reinforcement was evaluated according to the linear polarisation resistance technique. Accordingly, the corrosion rate of steel reinforcement is $4.53 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in the solution containing 1 M Cl^- . In this study, galvanic electrochemical sensors with low carbon steel anodes and copper cathodes were developed. In an environment with no or low Cl^- concentration, where the reinforcement is passivated, the corrosion current density of the sensor does not exceed $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The corrosion current of the sensor increases sharply under cathodic control with increasing chloride content. Thus, the developed sensor has a high sensitivity to chloride corrosion and is capable of detecting pitting corrosion caused by chlorides at an early stage.

Keywords: *Corrosion of steel reinforcement, chloride ions, galvanic electrochemical sensors, corrosion rate, concrete pore solution, ăn mòn cốt thép, ion clorua, cảm biến điện hóa galvanic, tốc độ ăn mòn, nước chiết bê tông.*

Nhận bài ngày 06 tháng 10 năm 2022

Phản biện xong ngày 20 tháng 10 năm 2022

Hoàn thiện ngày 21 tháng 10 năm 2022

⁽¹⁾ *Chi nhánh Ven Biển, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga*

⁽²⁾ *Khoa Hóa học, Trường Đại học Quốc gia Voronezh*

Liên hệ: Cao Nhật Linh

Chi nhánh Ven Biển, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga

Số 30 Nguyễn Thiện Thuật, Nha Trang, Khánh Hòa

Điện thoại: 0862452609; Email: cnlinh0812@gmail.com