

<https://doi.org/10.55505/sa.2026.1.08>

UDC: 631.313.6 : 620.197



EVALUAREA PROPRIETĂȚILOR ANTICOROZIVE ALE ACOPERIRILOR TERMICE ÎN JET DE PLAȘMĂ APLICATE PE DISCURILE GRAPELOR

Corneliu MUNTEANU¹, ORCID: 0000-0002-3878-9129,

Iurie MELNIC^{2*}, ORCID: 0000-0002-5279-4960,

Bogdan ISTRATE¹, ORCID: 0000-0003-0817-3523,

Ramona CIMPOEȘU¹, ORCID: 0000-0002-5128-4491,

Vitali VIȘANU², ORCID: 0000-0002-2273-342X,

Fabian-Cezar LUPU¹, ORCID: 0009-0008-5711-1314

¹Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Romania

²Universitatea Tehnică a Moldovei, Republica Moldova

*Correspondență: Iurie MELNIC - e-mail: iurie.melnic@im.utm.md

Abstract. When performing work within the framework of modern technologies for cultivating agricultural crops, disk harrows are widely used. Corrosion of agricultural machinery components caused by moisture, soil and plant debris accelerates wear and reduces the service life of the working parts from the interaction of the discs with the soil. The paper presents investigations on the corrosion resistance of discs with and without thermal plasma jet coatings applied to their working surfaces depending on the interaction environment and soil composition. The anti-corrosion effectiveness of three investigated coating systems was quantitatively evaluated by analyzing the potentiodynamic polarization curves, obtaining the electrochemical parameters extracted by extrapolating the Tafel slopes. The study of micrographs for the Initial sample (control substrate) reveals a severe corrosive attack, characterized by the formation of corrosion products with an irregular and extremely porous morphology. All coatings investigated improved the corrosion resistance of the substrate, but the P2 coating (Metco 136F) demonstrated the highest performance, reducing the corrosion rate from 339.77 $\mu\text{m}/\text{year}$ to 41.07 $\mu\text{m}/\text{year}$ compared to the uncoated Initial steel, which represents a more than 8-fold decrease in corrosion rate.

Keywords: Harrow; Discs; Thermal coatings; Anti-corrosion properties.

Rezumat. La efectuarea lucrărilor din cadrul tehnologiilor moderne de cultivare a culturilor agricole pe larg se folosesc grapele cu discuri. Coroziunea componentelor utilajelor agricole cauzată de umiditate, sol și resturi vegetale accelerează uzura și reduce durata de viață a organelor de lucru de la interacțiunea discurilor cu solul. În lucrare sunt prezentate investigații privind rezistența la coroziune a discurilor cu și fără acoperiri termice în jet de plasmă aplicate pe suprafețele de lucru a acestora în funcție de mediul de interacțiune și compoziția solului. Eficacitatea anticorozivă a trei sisteme de acoperire investigate a fost evaluată cantitativ prin analiza curbelor de polarizare potențiodinamică, obținând parametrii electrochimici extrași prin extrapolarea pantelor Tafel. Studiul micrografilor pentru proba Initial (substratul martor) relevă un atac coroziv sever, caracterizat prin formarea unor produse de coroziune cu o morfologie neregulată și

extrem de poroasă. Toate acoperirile investigate au îmbunătățit rezistența la coroziune a substratului, însă acoperirea P2 (Metco 136F) a demonstrat cea mai înaltă performanță, reducând viteza de coroziune de la 339,77 $\mu\text{m}/\text{an}$ până la 41,07 $\mu\text{m}/\text{an}$ comparativ cu oțelul Inițial fără acoperire, ceea ce reprezintă o scădere de peste 8 ori a vitezei de coroziune.

Cuvinte-cheie: *Grapă; Discuri; Acoperiri termice; Proprietăți anticorozive.*

INTRODUCERE

În cadrul tehnologiilor agricole moderne, pentru dezmiriștirea terenurilor după culturile cerealiere, discuirea solului după culturile prășitoare, combaterea buruienilor, mărunțirea și încorporarea resturilor vegetale în sol, afânarea creștelor de brazdă, precum și pregătirea patului germinativ pentru semănat sunt utilizate pe scară largă grapele cu discuri. Organele de lucru ale acestora sunt, de regulă, discuri rotative plane sau sferice, cu muchie lisă sau crestată etc. (Melnic, 2016).

Datorită robusteții și versatilității lor în diferite tipuri de sol și condiții de prezență a reziduurilor vegetale, grapele cu discuri rămân și în prezent printre cele mai utilizate utilaje agricole. Totuși, performanța acestora este foarte limitată de uzura abrazivă și de degradarea corozivă accelerată a discurilor, ceea ce conduce la creșterea costurilor de întreținere și la diminuarea calității lucrărilor de prelucrare a solului. Ca urmare a interacțiunii dintre organele active ale utilajelor agricole și sol în timpul lucrărilor de câmp, coroziunea poate influența negativ întregul proces tehnologic (Rani et al., 2022).

Coroziunea componentelor utilajelor agricole, cauzată de umiditate, sol și resturi vegetale, accelerează procesul de uzură și reduce durata de exploatare a organelor de lucru. Măsurile de prevenire și protecție împotriva coroziunii pentru grapele cu discuri grele sunt similare cu cele aplicate altor utilaje agricole, precum plugurile, cultivatoarele sau semănătorile, și includ (Vidaković et al., 2026):

- îndepărtarea temeinică a solului și a resturilor vegetale, urmată de spălarea cu apă sub presiune;
- acoperirea unui agent anticoroziv pe suprafața discurilor;
- lubrifierea corespunzătoare a lagărelor cu un lubrifiant adecvat;
- retușarea pieselor deteriorate prin aplicarea vopselei de protecție (în două straturi, grund și vopsea);
- depozitarea utilajelor într-un spațiu acoperit sau închis atunci când nu sunt utilizate.

Principalele cauze ale coroziunii organelor de lucru ale mașinilor agricole sunt contactul prelungit cu solul umed, acțiunea îngrășămintelor chimice agresive, pH-ul solului și depozitarea necorespunzătoare în spații deschise. Aceste condiții determină apariția unor efecte negative precum deteriorarea suprafețelor active, reducerea durității acestora, creșterea rezistenței la înaintare a agregatului și scăderea calității lucrărilor agricole. În acest context, devin esențiale următoarele aspecte (Munteanu et al., 2025):

- utilizarea oțelurilor de înaltă calitate la fabricarea discurilor grapelor agricole;
- aplicarea unor acoperiri termice pe suprafețele active ale discurilor.

Având în vedere durata îndelungată de exploatare a grapelor cu discuri, se impune investigarea rezistenței la coroziune a discurilor cu și fără acoperiri termice aplicate prin jet de plasmă pe suprafețele de lucru, în funcție de mediul de interacțiune și de compoziția solului.

MATERIALE ȘI METODE

Substratul utilizat în cadrul experimentelor a fost reprezentat de plăcuțe din oțel hipoeutectoid aliat, prelevate din discurile grapei analizate. Pe suprafața acestora au fost aplicate trei tipuri de acoperiri protectoare (Munteanu et al., 2026):

- 1) P1 - Metco 71NS (W2C / WC 12Co);
- 2) P2 - Metco 136F (Cr₂O₃ 4SiO₂ 4TiO₃);
- 3) P3 - Metco 45C-NS (Co 25,5Cr 10,5Ni 7,5W 0,5C).

Înainte de testare, probele au fost degresate și curățate ultrasonic în apă distilată. Suprafața activă expusă a fost de 0,6 cm², fiind delimitată prin utilizarea unui electrod prevăzut cu o garnitură izolatoare din teflon, ceea ce a asigurat etanșeitatea sistemului electrochimic. Toate investigațiile electrochimice au fost realizate cu ajutorul unui potențiostat/galvanostat OrigaStat (OrigaLys ElectroChem SAS), controlat prin software-ul OrigaMaster 5 (versiunea 2.5.0.5), platformă destinată controlului prin USB al echipamentelor de măsurare electrochimică.

Măsurătorile electrochimice au fost efectuate într-o celulă electrochimică clasică cu trei electrozi (Bard & Faulkner, 2001), configurată astfel:

- electrod de lucru (WE) – probele de oțel acoperite;
- electrod de referință (RE) – electrod de calomel saturat (SCE);
- electrod contra (CE) – electrod de platină.

Pentru simularea unui mediu de sol agresiv, s-a utilizat soluția standard NS4 (Near-Neutral pH soil solution) (Xue & Cheng, 2010), considerată reprezentativă pentru condiții de coroziune în medii de sol slab neutre. Compoziția chimică a electrolitului NS4 utilizat este prezentată în tabelul 1.

Tabelul 1. Compoziția chimică a soluției NS4 (Near-Neutral pH soil solution)

Reactiv	Concentrație (g/L)
KCl	0,122
NaHCO ₃	0,483
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,181
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,131

Procedura experimentală a fost efectuată într-o secvență specifică, cu scopul de a asigura reproductibilitatea rezultatelor. Inițial, a fost monitorizat potențialul de circuit deschis (OCP) timp de 60 de minute după imersia probelor în soluția de test, până la atingerea unei stări pseudo-staționare.

Pentru analiza comportamentului electrochimic, s-a realizat polarizarea potențiodinamică, prin scanarea potențialului de la -250 mV vs. OCP la +250 mV vs. OCP, cu o viteză de scanare de 1 mV/s.

Evaluarea integrității acoperirii și a rezistenței la pătrunderea ionilor din soluție s-a efectuat prin polarizare ciclică. În acest caz, potențialul a fost scanat în sens anodic, urmat de scanarea inversă, pentru identificarea buclei de histeresis, considerată indicator al degradării locale.

Parametrii de coroziune, inclusiv potențialul de coroziune și densitatea curentului de coroziune, au fost determinați prin metoda extrapolării curbelor Tafel (Papavinasam, 2008).

Caracterizarea prin spectroscopie de impedanță electrochimică (EIS) (Ruiz et al., 2020) a fost realizată utilizând același potențostat OrigaStat, operat prin software-ul OrigaMaster 5. Măsurătorile au fost efectuate la potențialul liber de coroziune (free potential), imediat după etapa de monitorizare a OCP.

Spectrele de impedanță au fost achiziționate într-un domeniu de frecvență de la 100 kHz la 10 mHz, utilizând o rezoluție de 10 puncte pe decadă de frecvență, pentru o descriere cât mai detaliată a proceselor de interfață.

Pentru asigurarea unui răspuns liniar al sistemului electrochimic și reducerea perturbărilor la nivelul suprafeței, s-a aplicat un semnal sinusoidal de curent alternativ cu amplitudinea de 10 mV. De asemenea, înainte de începerea achiziției datelor, s-a impus o etapă de pre-stabilizare de 60 s, pentru atingerea unei stări staționare a sistemului.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Eficacitatea anticorozivă a celor trei sisteme de acoperire investigate a fost evaluată cantitativ prin analiza curbelor de polarizare potențiodinamică. Parametrii electrochimici determinați prin extrapolarea pantelor Tafel sunt prezentați în tabelul 2.

Potențialul de coroziune, $E(I = 0)$, caracterizează tendința termodinamică a materialului de a se coroda în soluția NS4. Toate probele acoperite au prezentat o deplasare a potențialului de coroziune către valori mai pozitive (mai nobile) comparativ cu proba martor, al cărei potențial de coroziune este de -1113 mV.

Proba P1 (Metco 71NS) a înregistrat cel mai nobil potențial de coroziune, de -1014 mV, ceea ce sugerează existența unei bariere inițiale eficiente împotriva proceselor de coroziune. De asemenea, probele P2 (Metco 136F) și P3 (Metco 45C-NS) au prezentat o îmbunătățire a comportamentului electrochimic în raport cu substratul neacoperit, valorile potențialului de coroziune fiind de -1040 mV și, respectiv, -1060 mV.

Performanța superioară a acoperirilor este demonstrată în principal de valorile densității curentului de coroziune (j_{cor}) și ale vitezei de coroziune (v_{cor}).

Tabelul 2. Parametrii electrochimici de coroziune extrași din curbele de polarizare potențiodinamică pentru proba martor și cele trei sisteme de acoperire depuse pe substrat de oțel în soluție NS4

Proba	Potențialul de coroziune $E(I=0)$ (mV)	Densitatea curentului de coroziune j_{cor} $\mu A/cm^2$	Rezistența la polarizare R_p ($\Omega \cdot cm^2$)	Viteza de coroziune v_{cor} $\mu m/an$
P1 (Metco 71NS)	-1014	21,51	936,54	249,74
P2 (Metco 136F)	-1040	3,56	5680,00	41,07
P3 (Metco 45C-NS)	-1060	27,57	826,39	317,65
Initial (control)	-1113	29,84	280,31	339,77

Acoperirea ceramică a probei P2 oferă cel mai înalt nivel de protecție anticorozivă, evidențiat prin reducerea semnificativă a densității curentului de coroziune la 3,566 $\mu A/cm^2$, comparativ cu 29,84 $\mu A/cm^2$ în cazul oțelului neacoperit (control). Această reducere se reflectă și în valoarea vitezei de coroziune, care este de numai 41,076 $\mu m/an$, de aproximativ opt ori mai mică decât cea înregistrată pentru substratul neprotejat, de 339,77 $\mu m/an$. Probele P1 (Metco 71NS) și P3 (Metco 45C-NS) au condus, de asemenea, la îmbunătățirea rezistenței la coroziune a substratului, însă eficiența lor este inferioară celei obținute pentru acoperirea P2 (Metco 136F).

Valorile rezistenței la polarizare R_p , considerate un indicator direct al capacității stratului protector de a se opune transferului de sarcină la interfața metal-electrolit, confirmă tendința evidențiată de valorile densității curentului de coroziune. Proba P2 (Metco 136F) a înregistrat cea mai mare valoare a rezistenței la polarizare, de $5680 \Omega \cdot \text{cm}^2$, depășind cu peste un ordin de mărime valoarea obținută pentru proba martor. Acest rezultat indică faptul că structura compactă a acoperirii pe bază de oxizi de crom, siliciu și titan (Metco 136F) acționează ca o barieră dielectrică eficientă, limitând considerabil difuzia speciilor agresive din soluția NS4 către suprafața substratului.

Datele experimentale demonstrează că acoperirea P2 (Metco 136F) reprezintă cea mai eficientă soluție pentru protecția oțelului în mediul de sol simulat NS4. Performanța superioară a acesteia poate fi atribuită caracterului chimic inert al oxizilor metalici, în special oxidului de crom (Cr_2O_3) și oxidului de titan (TiO_2), care, spre deosebire de acoperirile pe bază de carburi (P1) sau aliaje metalice (P3), reduc numărul centrilor activi implicați în procesele de oxidare și asigură o rezistență de barieră mai ridicată.

Curbele de polarizare înregistrate pentru oțelul neprotejat (proba Initial sau martor) și pentru probele acoperite (P1, P2 și P3), prezentate în figura 1, evidențiază modificări semnificative atât în domeniul anodic, cât și în cel catodic.

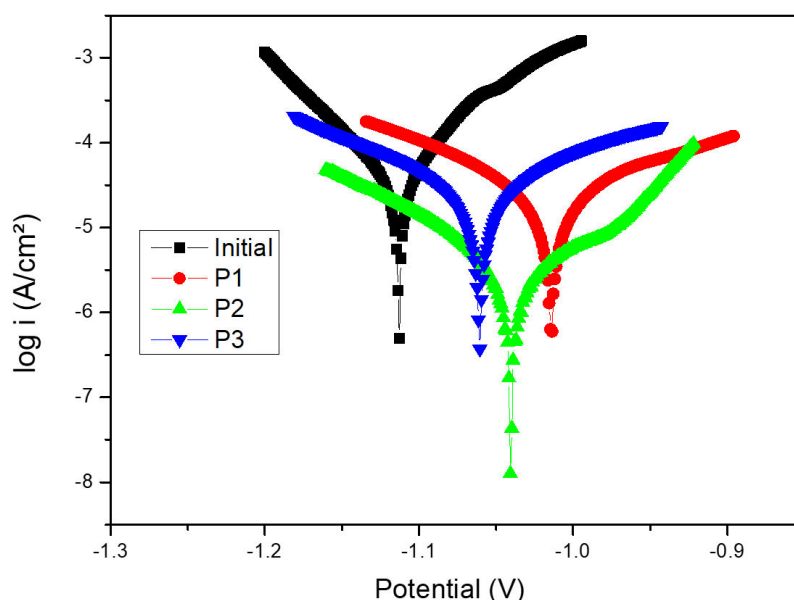


Figura 1. Curbe de polarizare potențiodinamică (diagrame Tafel) pentru substratul Initial (control) și pentru acoperirile investigate în soluție NS4

Toate probele prezintă pante catodice similare, ceea ce sugerează că mecanismul reacției de reducere (cel mai probabil reducerea oxigenului sau a apei în mediul neutru NS4) rămâne același pentru toate sistemele investigate, iar diferențele sunt determinate în principal de suprafața activă disponibilă pentru desfășurarea reacției. Se observă o creștere a pantei anodice în cazul probei P2, fapt ce confirmă o rezistență de barieră superioară la dizolvarea anodică. În schimb, curba de polarizare a probei P3 (Metco 45C-NS) rămâne foarte apropiată de cea a probei martor, indicând o protecție limitată și o reactivitate electrochimică mai ridicată a matricei pe bază de cobalt în acest electrolit. Pe baza analizei curbelor Tafel obținute în soluția NS4, ierarhia performanței anticorozive poate fi stabilită astfel: $P2 > P1 > P3 > \text{Initial}$ (control).

Rezistența acoperirilor la coroziunea localizată și integritatea stratului protector la potențiale anodice ridicate au fost investigate prin tehnica polarizării ciclice (Figura 2), metodă care permite determinarea potențialului de rupere a filmului pasiv și evaluarea capacității de repassivare a suprafeței.

Analiza diagramelor obținute evidențiază diferențe importante în comportamentul probelor supuse polarizării anodice la potențiale ridicate. Se remarcă faptul că proba P1 (Metco 71NS) prezintă cea mai redusă densitate a curentului anodic pe întregul domeniu de potențial investigat. La potențialul de inversare de +0,7 V, densitatea curentului atinge aproximativ 1,0 mA/cm², valoare semnificativ mai mică decât cele înregistrate pentru celelalte probe. De asemenea, curba de întoarcere a probei P1 este situată sub curba directă, rezultând un histerezis negativ, ceea ce indică absența formării unor centre stabile de coroziune localizată și sugerează o bună stabilitate a matricei de cobalt ranforsate cu carburi de wolfram în mediul coroziv NS4.

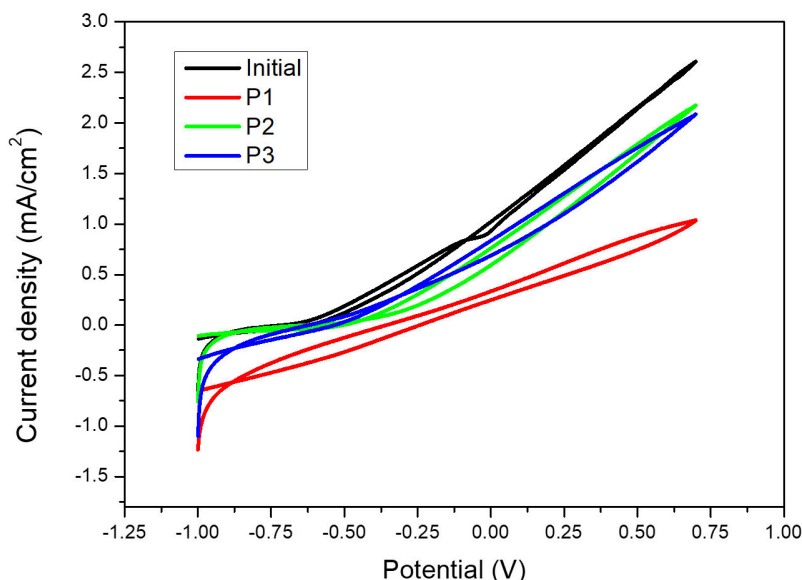


Figura 2. Curbe de polarizare ciclică pentru probele de oțel acoperite în soluție NS4

Probele P2 (Metco 136F) și P3 (Metco 45C-NS) prezintă o creștere rapidă a densității curentului odată cu deplasarea potențialului în sens anodic, atingând valori de peste 2,0 mA/cm² la +0,7 V. În cazul probei P2, curentul crește semnificativ, deși în testele Tafel aceasta a evidențiat o viteză de coroziune mai redusă la potențiale apropiate de echilibru. Acest comportament poate fi explicat prin prezența unor micro-pori în structura ceramică a oxidului de Cr/Si/Ti, care favorizează pătrunderea electrolitului sub acțiunea câmpului electric intens.

Analiza substratului (Initial) arată că proba martor prezintă cea mai ridicată densitate a curentului anodic, confirmând susceptibilitatea crescută a oțelului neprotejat la dizolvare anodică generalizată în soluția de sol simulat. Din perspectiva coroziunii localizate, absența unei bucle largi de histerezis pozitiv (în care curentul la revenire este semnificativ mai mare decât la scanarea directă) pentru toate probele sugerează că, în condițiile soluției NS4, nu se dezvoltă un proces de pitting sever și ireversibil. Totuși, densitatea redusă de curent a probei P1 indică faptul că aceasta oferă cea mai bună protecție pe termen lung împotriva fluctuațiilor de potențial în domeniul anodic, menținând integritatea suprafeței chiar și în condiții de solicitare electrochimică ridicată.

Modelul utilizat pentru interpretarea datelor EIS pentru proba Inițial este un circuit Randles de tip R(QR), în care interfața este descrisă printr-o singură constantă de timp (Figura 3). Pentru analiza cantitativă a spectrelor EIS ale probei P2, datele experimentale au fost ajustate utilizând un circuit electric echivalent de tip R. Alegerea acestui model este justificată de natura poroasă a straturilor depuse prin pulverizare termică, permițând separarea contribuției rezistenței la penetrarea electrolitului prin pori de cea a rezistenței la transferul de sarcină la interfața metal-soluție (Hinderliter et al., 2006).

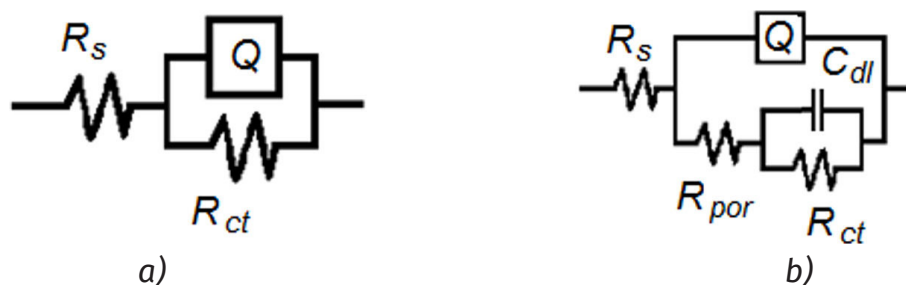


Figura 3. Circuitele echivalente utilizate pentru interpretarea datelor EIS:

- a) proba Initial, b) proba P2, unde R_s - rezistența soluției NS4 (Solution Resistance), Ω/cm^2 ;
 Q - capacitatea sistemului, Ssn/cm^2 ; R_{por} - rezistența la pori (Pore Resistance), Ω/cm^2 ;
 C_{dl} - capacitatea stratului dublu electric (Electric Double Layer Capacitance), $\mu\text{F}/\text{cm}^2$;
 R_{ct} - rezistența la transfer de sarcină (Charge Transfer Resistance), Ω/cm^2 .

Pentru interpretarea cantitativă a spectrelor EIS au fost analizați parametrii rezultați din ajustarea circuitelor echivalente pentru proba Initial și proba P2 (Figura 3). Astfel, rezistența R_s reprezintă rezistența soluției NS4 dintre electrodul de referință și probă. Elementul de fază constantă (CPE) este utilizat în locul unui condensator ideal pentru a descrie deviația comportamentului capacitiv, asociată cu deprimarea semicercului din diagramele Nyquist, determinată de rugozitatea și neomogenitatea straturilor depuse prin pulverizare termică.

Rezistența la pori (R_{por}) caracterizează rezistența acoperirii la penetrarea electrolitului NS4 prin pori și defecte structurale, fiind un indicator al proprietăților de barieră ale stratului. Capacitatea stratului dublu (C_{dl}) reprezintă capacitatea stratului dublu electric format la interfața dintre oțel și electrolitul care a reușit să pătrundă prin acoperire. Rezistența la transfer de sarcină (R_{ct}) este direct legată de viteza proceselor de coroziune ale oțelului sub stratul de acoperire.

Pentru evaluarea cantitativă a îmbunătățirii proprietăților de barieră, parametrii extrași din circuitele echivalente pentru proba Initial și proba P2 sunt prezentați comparativ în tabelul 3.

Tabelul 3. Parametrii electrochimici obținuți în urma modelării spectrelor EIS în soluție NS4

Proba	R_s (Ω/cm^2)	CPE		R_{por} (Ω/cm^2)	C_{dl} $\mu\text{F}/\text{cm}^2$	R_{ct} (Ω/cm^2)	$10^3 x^2$
		Q (Ssn/cm^2)	n				
Initial (control)	119	$5,28 \cdot 10^{-4}$	0,682		–	633	2,33
P2	270	$1,75 \cdot 10^{-4}$	0,52	6381	$5,365 \cdot 10^{-5}$	81064	1,95

În timp ce substratul inițial prezintă o rezistență la transfer de sarcină de doar 633 Ω/cm^2 , aplicarea acoperirii ceramice Metco 136F (P2) determină o creștere semnificativă a acestui parametru până la 81064 Ω/cm^2 . Această majorare de peste 120 de ori a rezistenței demonstrează eficacitatea superioară a stratului protector în inhibarea reacțiilor electrochimice la suprafața oțelului în mediul agresiv NS4.

Valoarea mai scăzută a exponentului n pentru proba P2 (0,52 față de 0,68) sugerează o complexitate structurală mai ridicată a interfeței, determinată de porozitatea intrinsecă a stratului depus prin pulverizare termică, care conduce la o distribuție neuni-

formă a curentului în mediul NS4. Se constată, de asemenea, o scădere a parametrului Q (capacitatea sistemului) de la 5,28 (proba Initial) la $1,75 \cdot 10^{-4} \text{ Ss}^n/\text{cm}^2$ (P2). Din punct de vedere fizic, diminuarea capacității interfeței odată cu aplicarea acoperirii P2 confirmă formarea unei bariere protectoare compacte. Deoarece capacitatea este invers proporțională cu grosimea stratului dielectric, valorile mai reduse ale Q pentru proba P2 indică faptul că acoperirea Metco 136F limitează eficient zona de contact direct dintre electro-litul NS4 și substratul metalic, măbind distanța de difuzie a speciilor corozive.

Parametrul R_{por} ($6381 \Omega/\text{cm}^2$) din modelul probei P2 indică formarea unei bariere fizice care restricționează accesul soluției NS4 către substrat. Valoarea acestuia este de aproape 10 ori mai mare decât rezistența corespunzătoare sistemului neprotejat.

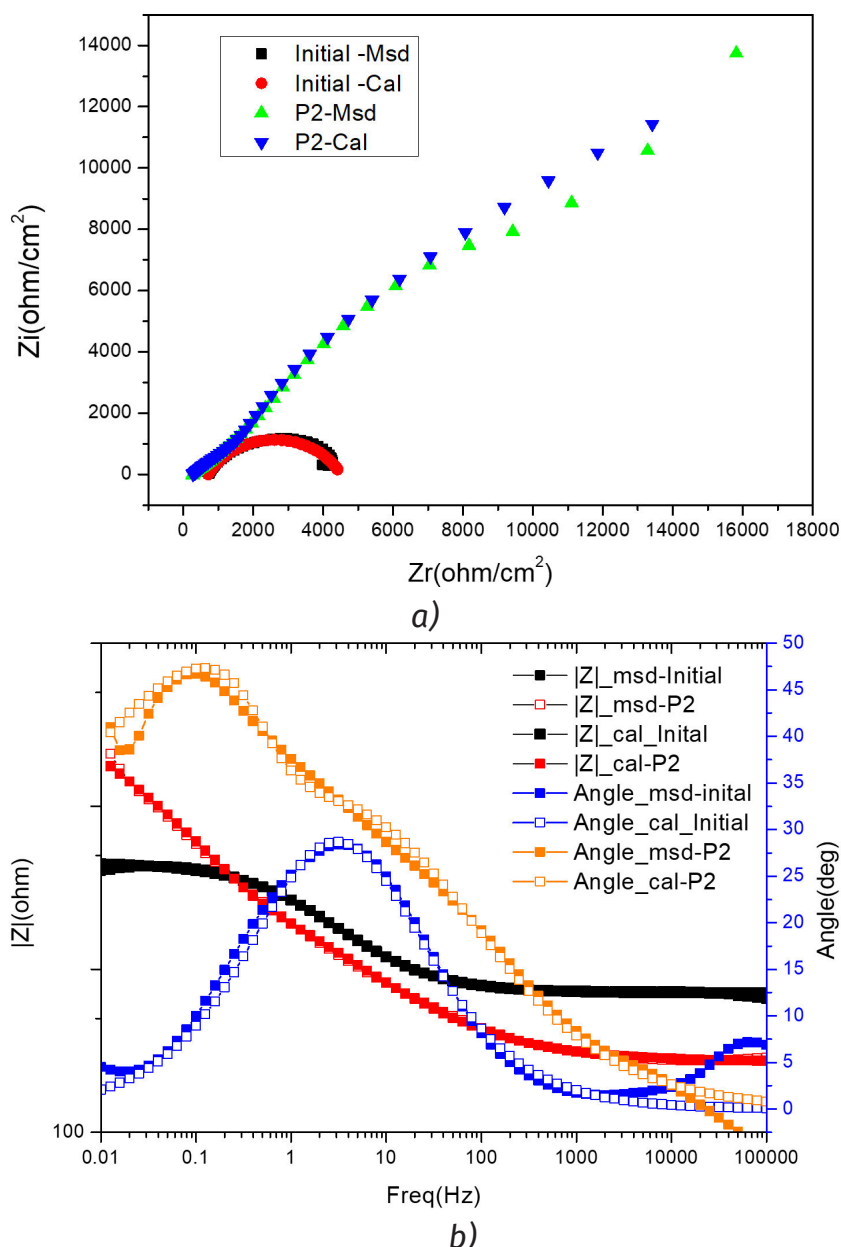


Figura 4. Rezultatele spectroscopiei de impedanță electrochimică (EIS) pentru proba martor și proba P2 în soluție NS4: a) diagrame Nyquist; b) diagrame Bode.

Rezultatele EIS sunt prezentate sub formă de diagrame Nyquist și Bode în figura 4, incluzând atât datele experimentale (Msd), cât și datele calculate prin modelarea cu circuite echivalente (Cal). Diagrama Nyquist (Figura 4a) evidențiază diferențe majore între

substratul inițial și proba acoperită P2. Proba inițială prezintă un singur arc semicircular de dimensiuni reduse, indicând o rezistență scăzută la transferul de sarcină ($R_{ct} = 633 \Omega/\text{cm}^2$). În cazul probei P2 (Metco 136F), arcul de impedanță este semnificativ mai extins, iar creșterea diametrului semicercului demonstrează capacitatea superioară de barieră a acoperirii ceramice, care inhibă puternic procesele de oxidare la suprafața metalului.

Valoarea mai scăzută a exponentului n pentru proba P2 (0,52 față de 0,68) sugerează o complexitate structurală mai ridicată a interfeței, determinată de porozitatea intrinsecă a stratului depus prin pulverizare termică, care conduce la o distribuție neuniformă a curentului în mediul NS4. Se constată, de asemenea, o scădere a parametrului Q (capacitatea sistemului) de la 5,28 (proba Initial) la $1,75 \cdot 10^{-4} \text{ Ssn}/\text{cm}^2$ (P2). Din punct de vedere fizic, diminuarea capacității interfeței odată cu aplicarea acoperirii P2 confirmă formarea unei bariere protectoare compacte. Deoarece capacitatea este invers proporțională cu grosimea stratului dielectric, valorile mai reduse ale Q pentru proba P2 indică faptul că acoperirea Metco 136F limitează eficient zona de contact direct dintre electrolitul NS4 și substratul metalic, măbind distanța de difuzie a speciilor corozive.

Parametrul R_{por} ($6381 \Omega/\text{cm}^2$) din modelul probei P2 indică formarea unei bariere fizice care restricționează accesul soluției NS4 către substrat. Valoarea acestuia este de aproape 10 ori mai mare decât rezistența corespunzătoare sistemului neprotejat.

Rezultatele EIS sunt prezentate sub formă de diagrame Nyquist și Bode în figura 4, incluzând atât datele experimentale (Msd), cât și datele calculate prin modelarea cu circuite echivalente (Cal). Diagrama Nyquist (Figura 4a) evidențiază diferențe majore între substratul inițial și proba acoperită P2. Proba inițială prezintă un singur arc semicircular de dimensiuni reduse, indicând o rezistență scăzută la transferul de sarcină ($R_{ct} = 633 \Omega/\text{cm}^2$). În cazul probei P2 (Metco 136F), arcul de impedanță este semnificativ mai extins, iar creșterea diametrului semicercului demonstrează capacitatea superioară de barieră a acoperirii ceramice, care inhibă puternic procesele de oxidare la suprafața metalului.

Diagramele Bode (Figura 4b) oferă informații suplimentare privind stabilitatea sistemului în funcție de frecvență. În domeniul frecvențelor joase (0,01 Hz), valoarea $|Z|$ pentru proba P2 este cu aproximativ două ordine de mărime mai mare decât cea a probei martor. O valoare ridicată a impedanței la frecvențe joase este un indicator direct al unei rezistențe ridicate la coroziune.

Proba inițială prezintă un singur maxim al unghiului de fază la aproximativ $25-30^\circ$, caracteristic unei singure constante de timp asociate stratului dublu electric. Proba P2 prezintă un profil mai larg al unghiului de fază, cu valori maxime apropiate de 50° pe un interval extins de frecvențe. Lărgirea acestui maxim sugerează prezența a două constante de timp suprapuse: una asociată capacității acoperirii (CPE-coat) și cealaltă proceselor de la baza porilor ($R_{ct} - Cdl$). Acest comportament confirmă faptul că acoperirea Metco 136F nu acționează doar ca o barieră fizică, ci modifică semnificativ cinetica proceselor de coroziune la interfața cu oțelul, asigurând o protecție stabilă în mediul NS4.

Diferențele de comportament pot fi explicate prin natura chimică a materialelor pulverizate: proba P2 (Metco 136F) este o acoperire pe bază de oxizi (Cr/Si/Ti), caracterizați prin stabilitate chimică ridicată și proprietăți dielectrice, ceea ce conferă o rezistență de barieră superioară.

Proba P1 (Metco 71NS), deși conține carburi, are o matrice metalică pe bază de cobalt, mai susceptibilă la atac localizat în prezența ionilor din NS4. Proba P3 (Metco 45C-NS), un aliaj complex Co-Cr-Ni-W-C, prezintă performanțe mai reduse, posibil din cauza unei porozități mai ridicate sau a unei activități electrochimice crescute a componentelor metalice în acest mediu.

Caracterizarea morfologică a suprafețelor, realizată prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) după testele electrochimice în soluție NS4, este prezentată în figurile 5–8, oferind dovezi vizuale relevante privind mecanismele de degradare ale substratului martor și integritatea structurală a acoperirilor P1, P2 și P3.

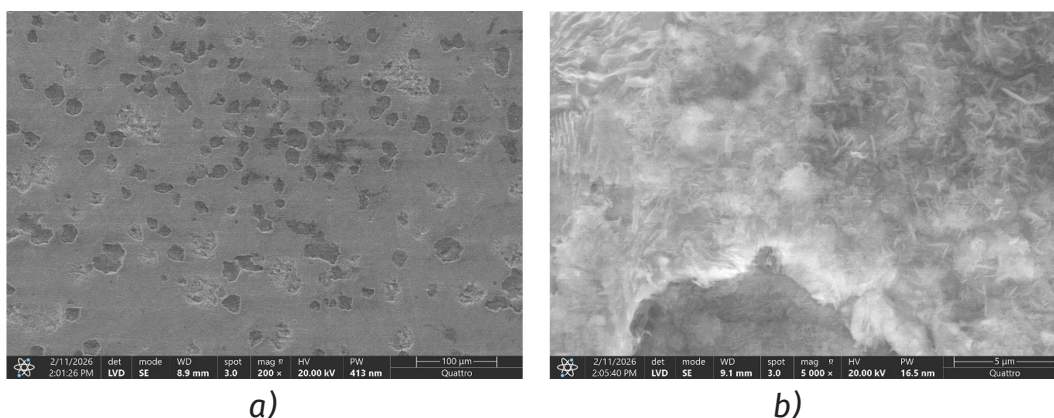


Figura 5. Micrografii SEM ale suprafeței probei martor (Initial) după testele de coroziune în soluție NS4: a) imagine de ansamblu la magnificația de 200x cu evidențierea atacului coroziv; b) detaliu al micro-morfologiei suprafeței și a produselor de coroziune la magnificația de 5000x

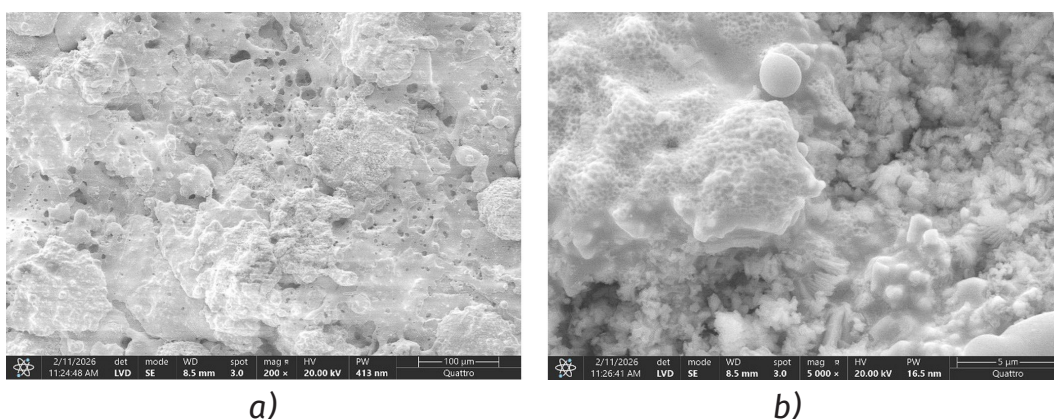


Figura 6. Micrografii SEM ale suprafeței acoperirii P1 (Metco 71NS) după expunerea la soluția corozivă NS4: a) la magnificația de 200x, prezentând o bună integritate structurală a stratului depus; b) detaliu la 5000x

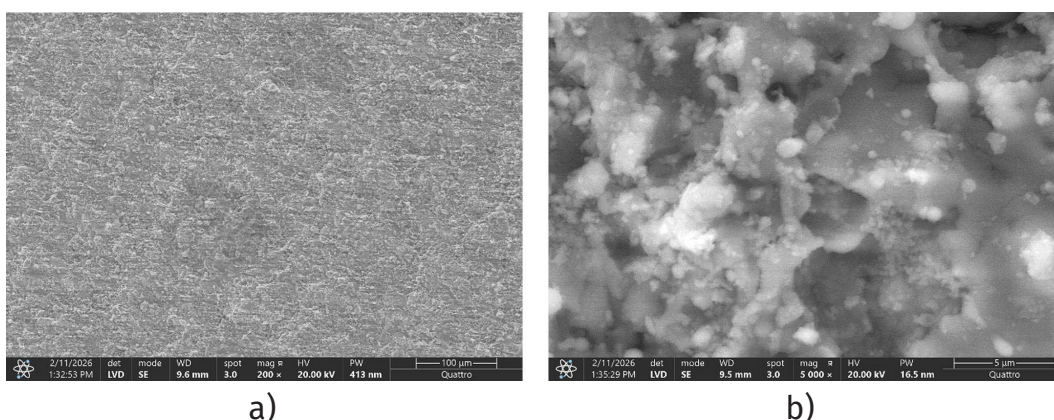


Figura 7. Micrografii SEM ale suprafeței acoperirii P2 (Metco 136F) după testele electrochimice în mediu NS4: a) vedere de ansamblu la 200x, ilustrând o suprafață foarte compactă și omogenă; b) imagine la 5000x, evidențiind natura densă și ceramică a stratului protector

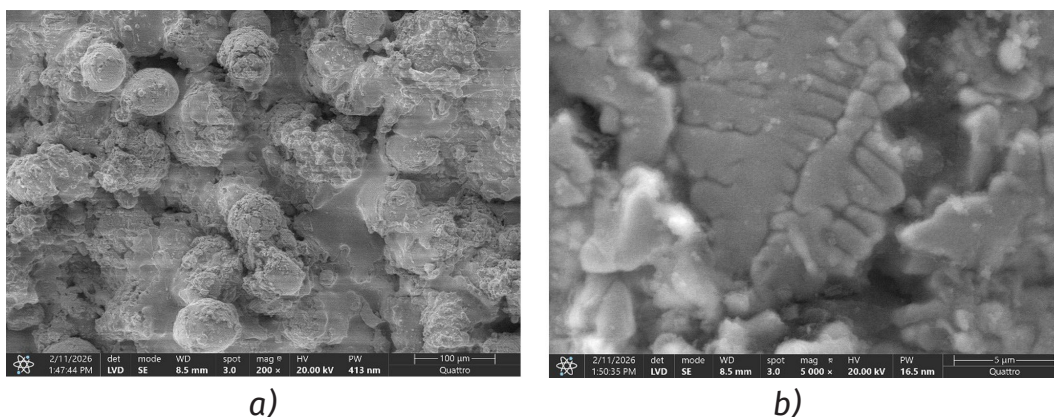


Figura 8. Micrografii SEM ale suprafeței acoperirii P3 (Metco 45C-NS) după coroziune în soluție NS4: a) la 200x, evidențiind zone de atac coroziv preferențial la nivelul micro-defectelor; b) detaliu la 5000x, prezentând porozitatea stratului și degradarea matricei metalice

Micrografiile pentru proba Initial (substratul martor) evidențiază un atac coroziv sever, caracterizat prin formarea unor produse de coroziune cu morfologie neregulată și puternic poroasă la magnificația de 5000x. Această structură slab aderentă nu poate asigura o barieră pasivă eficientă, ceea ce explică viteza ridicată de coroziune de 339,77 $\mu\text{m}/\text{an}$ și valoarea redusă a rezistenței la transfer de sarcină de numai 633 Ω/cm^2 , obținută prin modelarea datelor de impedanță.

În contrast, acoperirea P2 (Metco 136F) prezintă cea mai mare stabilitate morfologică, menținând o suprafață compactă, omogenă și fără defecte majore vizibile chiar și după testele de polarizare anodică. Această compactitate structurală corelează direct cu valorile ridicate ale rezistenței la transfer de sarcină. Natura ceramică a oxizilor din compoziția probei P2 acționează ca o barieră dielectrică eficientă, limitând semnificativ difuzia speciilor corozive către substrat și determinând reducerea vitezei de coroziune la 41,076 $\mu\text{m}/\text{an}$.

Proba P1 (Metco 71NS) prezintă o stabilitate bună a matricei metalice în care sunt ancorate carburile de wolfram, ceea ce explică absența buclelor de histerezis pozitive în diagramele de polarizare ciclică. Totuși, micrografiile SEM pentru proba P3 (Metco 45C-NS) indică o degradare localizată mai pronunțată la nivelul micro-defectelor stratului, confirmând performanța sa protectoare mai redusă. Porozitatea vizibilă a acoperirii P3 a favorizat infiltrarea electrolitului NS4.

CONCLUZII

Studiul a evaluat performanța anticorozivă a trei acoperiri depuse prin pulverizare termică pe substrat de oțel hipoeutectoid aliat, provenit din discuri de grapă agricolă, în soluție de sol simulat NS4. Toate acoperirile investigate au îmbunătățit rezistența la coroziune a substratului, însă acoperirea P2 (Metco 136F) a demonstrat performanța cea mai înaltă. Aceasta a redus viteza de coroziune de la 339,77 $\mu\text{m}/\text{an}$ (oțel inițial) la 41,076 $\mu\text{m}/\text{an}$, reprezentând o diminuare de peste 8 ori.

Rezultatele Tafel indică o deplasare a potențialului de coroziune către valori mai nobile pentru toate probele acoperite. Proba P2 a prezentat cea mai scăzută densitate a curentului de coroziune (3,566 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) și cea mai mare rezistență la polarizare (5680 Ω/cm^2), confirmând stabilitatea sa chimică superioară în mediul NS4.

Analiza prin spectroscopie de impedanță electrochimică a confirmat rolul de barieră dielectrică al acoperirii P2. Modelarea prin circuite echivalente a evidențiat o creștere a rezistenței la transfer de sarcină (R_{ct}) de la 633 Ω/cm^2 (proba martor) la 81.060 Ω/cm^2 (proba P2), demonstrând o inhibare eficientă a proceselor electrochimice la interfața metal-electrolit.

Acoperirea ceramică pe bază de oxizi de crom, siliciu și titan (Metco 136F) este recomandată pentru protecția structurilor din oțel expuse în medii de sol, datorită structurii sale dense și rezistenței anticorozive superioare.

ACKNOWLEDGEMENTS

Cercetările au fost realizate în cadrul proiectului bilateral România–Republica Moldova PN-IV-P8-8.3-ROMD-2023-0108 (13 ROMD–2024), finanțat de UEFISCDI România, intitulat „Cercetări asupra îmbunătățirii durabilității grapelor cu discuri prin acoperiri termice în jet de plasmă”.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

1. BARD, A. and L. FAULKNER (2001). *Electrochemical methods. Fundamentals and applications*. 2nd edition. New York: JOHN WILEY & SONS, Inc., 833 p. ISBN 0-471-04372-9. Disponibil: https://www.academia.edu/15060550/Allen_J_Bard_Larry_R_Faulkner
2. HINDERLITER, B.; S. CROLL; D. TALLMAN; Q. SU and G. BIERWAGEN (2006). Interpretation of EIS data from accelerated exposure of coated metals based on modeling of coating physical properties. *Electrochimica Acta*, vol. 51(21), pp. 4505–4515. ISSN 0013-4686. Disponibil: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468606000193?via%3Dihub>
3. MELNIC, Iu. (2016). Studiul teoretic al organelor de lucru de tip cuțit-disc ale mașinilor agricole. *Știința agricolă*, nr. 2, pp. 83–87. ISSN 1857-0003, eISSN 2587-3202. Disponibil: <https://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/23797/IAS-2016-N2-p83-87.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. MUNTEANU, C.; Iu. MELNIC; B. ISTRATE; M. HARDIMAN; L. GAIGINSCHI et al. (2025). A Comprehensive Review of Improving the Durability Properties of Agricultural Harrow Discs by Atmospheric Plasma Spraying (APS). *Coatings*, vol. 15(6). ISSN 2079-6412. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/coatings15060632>
5. MUNTEANU, C.; Iu. MELNIC; V. ARSENOAIA; B. ISTRATE; F. LUPU et al. (2026). Wear Performance of Agricultural Harrow Discs Coated by Plasma-Jet Thermal Deposition. *Machines. Technologies. Materials. International Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry*, vol. 20(3), pp. 81–84. ISSN 1314-507X. Disponibil: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2026/3/81>
6. PAPA VINASAM, S. (2008). Electrochemical polarization techniques for corrosion monitoring. Chapter 3. In: L. Yang (ed.), *Techniques for Corrosion Monitoring*. Woodhead Publishing, pp. 49–85. ISBN 9781845691875. Disponibil: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9781845691875500030?via%3Dihub>
7. RANI, A.; T. SINGH; J. SINGH; V. PATEL and M. CHOUDHARY (2022). Abrasive wear behavior of EN42 steel used in agricultural discs in field conditions. *Engineering Failure Analysis*, vol. 142. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106789>
8. RUIZ, A.; H. HERNÁNDEZ; J. HERNÁNDEZ; R. OROZCO-CRUZ; A. RUIZ et al. (2020). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels. *Electrochemical impedance spectroscopy*. DOI 10.5772/intechopen.94470.
9. VIDAKOVIĆ, I.; G. PAČAREK; D. RADOCAJ and I. ANDRIĆ (2026). Corrosion on Parts of Agricultural Machinery. *Engineering Proceedings*, vol. 125(1). ISSN 2673-4591. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/engproc2026125003>
10. XUE, H. and Y. CHENG (2010). Electrochemical corrosion behavior of X80 pipeline steel in a near-neutral pH solution. *Materials and Corrosion*, vol. 61(9), pp. 756–761. DOI 10.1002/maco.200905430.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. All authors read and approved the final manuscript.

Paper history

Received 05.04.2026; Accepted 15.05.2026

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).