

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
“GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI**



**– REZUMAT –
TEZĂ DE DOCTORAT**

**Obținerea și studiul proprietăților de utilizare a unor blindaje obținute prin
pulverizare la rece pe oțel 52100**

Coordonator științific:

Prof. univ.dr.ing. MUNTEANU Corneliu

Doctorand:

Drd. ing. LUPU Fabian Cezar

IAȘI – 2024

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL**

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 26.04.2024 la ora 09³⁰ în Aula Universității Tehnice "Gheorghe Asachi" din Iași, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"OBȚINEREA ȘI STUDIUL PROPRIETĂȚILOR DE UTILIZARE A UNOR BLINDAJE
OBȚINUTE PRIN PULVERIZARE LA RECE PE OȚEL 52100"**

elaborate de domnul **LUPU FABIAN CEZAR** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. **Conf.Dr.Ing. Ianuș Gelu**, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
președinte
2. **Prof.Univ.Dr.Ing. Munteanu Corneliu**, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
conducător de doctorat
3. **Prof. PhD. Eng. Sinan Müftü**, Universitatea Northeastern din Boston, SUA
referent oficial
4. **Prof.Univ.Dr.Habil.Ing. Miculescu Florin**, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
referent oficial
5. **Prof.Univ.Dr.Ing. Popa Cătălin**, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
referent oficial
6. **Prof.Dr.Ing. Goanță Viorel**, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof.univ.dr.ing. **DAN CAȘCAVAL**

Secretar universitate,

Ing. **Cristina Nagiț**



CUPRINS

CAPITOLUL 1. Considerații generale asupra materialelor utilizate pentru blindaje	1
1.1. Clasificare.....	1
1.2. Materiale utilizate pentru blindaje	1
1.3. Influența elementelor de aliere în oțelurile utilizate pentru blindaje	1
1.4. Îmbunătățirea proprietăților blindajelor prin tratamente termice.....	1
1.5. Concluzii parțiale.....	1
CAPITOLUL 2. Tehnologii moderne de pulverizare utilizate pentru îmbunătățirea proprietăților fizico - chimice - mecanice.	2
2.1. Metoda de pulverizare Cold Spray	2
2.2. Pulverizarea cu flacăra (Flame spraying).....	2
2.3. Pulverizare prin procedeul HVOF (High Velocity Oxy Fuel).....	2
2.4. Procedeul Detonation Gun (D-gun).....	2
2.5. Procedeul de pulverizare termică cu arc tip Wire Arc Spray.....	3
2.6. Procedeul de pulverizare termică tip APS (Arc Plasma Spray).....	3
2.7. Procedeul de pulverizare termică tip VPS (Vacuum Plasma Spray).....	3
2.8. Procedeul de pulverizare termică tip LPPS (Low Pressure Plasma Spray)	3
2.10. Procedeul de pulverizare termică tip WS (Warm Spraying).....	3
CAPITOLUL 3. Tipuri de materiale utilizate pentru îmbunătățirea proprietăților prin metoda de depunere superficială Cold Spray	3
3.1. Proprietățile oțelului 52100, în calitate de material de bază pentru pulverizare superficială	3
3.2. Pulberi utilizate pentru acoperiri ce îmbunătățesc proprietățile mecanice	3
3.3. Pulberi utilizate pentru acoperiri ce îmbunătățesc rezistența la coroziune.....	3
3.4. Proprietăți microstructurale ale acoperirilor prin metoda „Cold Spray”	3
3.5. Proprietăți mecanice ale acoperirilor prin metoda Cold Spray	4
3.6. Proprietăți de rezistență la coroziune a acoperirilor prin metoda Cold Spray	4
3.7. Rezultate obținute până în prezent prin utilizarea metodei Cold Spray.....	4
3.9. Obiective și plan experimental.	4
CAPITOLUL 4. Metode și instalații de analiză a acoperirilor realizate prin metoda de pulverizare Cold Spray.	4
4.1. Instalația de depunere Cold Spray.....	4
4.2. Echipamente utilizate în cadrul analizelor structurale.....	4
4.2.1. Microscopul electronic cu scanare Quanta 200 3D Dual Beam.	5
4.2.2. Microscopia optică.....	5
4.2.3. Difractomerul cu raze X.	6
4.3. Echipamente utilizate în cadrul cercetărilor proprietăților tribologice.....	6
4.3.1. Tribometrul CETR UMT-2.....	6
4.3.2. Mașina de încercări Instron.....	7
4.4. Metode și echipamente utilizate în cadrul efectuării analizelor electrochimice.	7
CAPITOLUL 5. Rezultate experimentale de obținere a depunerilor superficiale prin metoda Cold Spray.	8
5.1. Planificarea efectuării cercetărilor experimentale.	8
5.2. Depunerile efectuate prin metoda Cold Spray.....	8

5.3. Analiza structurală a straturilor superficiale depuse utilizând pulberi WIP-C1 prin metoda Cold Spray prin intermediul microscopiei optice și electronice.....	10
5.4. Concluzii parțiale.....	10
CAPITOLUL 6. Rezultate experimentale asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale depunerilor superficiale realizate prin metoda Cold Spray.	13
6.1. Determinarea comportamentului la oboseală.....	13
6.1.1. Încercări la tracțiune statică.....	13
6.1.2. Considerații generale asupra încercărilor la oboseală.....	14
6.1.3. Determinări la oboseală efectuate asupra probelor acoperite.....	15
6.2. Determinarea durității.....	20
6.3. Determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de translație și de rotație.....	20
6.4. Teste de microindentare și determinarea aderenței stratului prin microzgâriere (microscratch).....	23
6.5. Concluzii parțiale.....	23
CAPITOLUL 7. Rezultate experimentale asupra comportamentului la coroziune a depunerilor prin metoda Cold Spray.....	25
7.1. Determinarea comportamentului la coroziune electrochimică prin metoda potențiodinamică.....	25
7.2. Determinarea comportamentului la coroziune electrochimică prin spectroscopie de impedanță electrochimică.....	26
7.3. Concluzii parțiale.....	26
CAPITOLUL 8. Concluzii finale, contribuții personale, direcții viitoare de cercetare și diseminarea rezultatelor cercetării.....	29
8.1. Concluzii finale.....	29
8.2. Contribuții personale.....	29
8.3. Direcții viitoare de cercetare.....	29
8.4. Diseminarea rezultatelor cercetării.....	29
BIBLIOGRAFIE.....	30

INTRODUCERE

Industria de apărare și mentenanță a vehiculelor de luptă reprezintă un sector strategic vital pentru securitatea națională și stabilitate geopolitică. Această industrie se concentrează pe dezvoltarea, producția și întreținerea vehiculelor din sectorul militar. Vehiculele de luptă, precum sunt tancurile, transportoarele blindate și vehiculele de recunoaștere, joacă un rol esențial în capacitățile forțelor armate, oferind o platformă mobilă și puternică pentru desfășurarea operațiunilor militare. Acest sector este funcțional și eficient datorită implicării și colaborării strânse dintre ingineri, cercetători și producători, având ca scop dezvoltarea celor mai avansate tehnologii ale echipamentelor militare. Mentenanța și modernizarea constantă a acestor vehicule sunt esențiale pentru a se menține o performanță optimă în timpul misiunilor și pentru a face față evoluțiilor tehnologice și amenințărilor din ce în ce mai complexe. Industria de apărare și mentenanță a vehiculelor de luptă, nu doar contribuie la forța militară a unei țări, ci și la stimularea inovației tehnologice, aducând beneficii semnificative și în domeniul civil.

Metodele de depunere prezintă tendința de integrare în sectorul industriei militare și de apărare, cercetătorii și inginerii explorând continuu modalități inovatoare de îmbunătățire a performanței materialelor de blindaje, iar tehnica de depunere Cold Spray (pulverizare la rece), reprezintă o abordare fascinantă și eficientă în acest sens.

Metoda de depunere Cold Spray, în calitate de proces de pulverizare termică, are la bază o creștere dinamică a accelerației gazului ce atinge viteze supersonice și conduce la obținerea de energii cinetice cu valori ridicate, permițând consolidarea particulelor (materia primă) în materialul de bază printr-un fenomen de interblocare mecanică. Această metodă devine unică prin faptul că este singura tehnică de depunere ce reușește să depună particulele sub punctul lor de topire, astfel încât temperaturile de depunere sunt extrem de scăzute prin comparație cu celelalte tehnici de depunere la care depunerea este un rezultat al topirii particulelor.

Această tehnică devine atractivă pentru industria militară deoarece poate contribui semnificativ la îmbunătățirea proprietăților materialelor de blindaj, sporind nivelul de protecție împotriva amenințărilor balistice sau explozive, astfel încât vehiculele de luptă beneficiază de un nivel superior de rezistență și protecție. Cercetările efectuate au condus la rezultate remarcabile asupra performanțelor materialelor de blindaje, realizându-se depuneri eficiente ale straturilor fără a se deteriora sau compromite materialul de bază. Mai mult de atât, această tehnică permite, atât îmbunătățirea proprietăților materialului de bază în procesele de fabricație, cât și pretarea excelentă pe procesele de mentenanță în ceea ce privește restaurarea diferitelor componente cu un grad ridicat de uzură.

Scopul acestui studiu este de a expune măsura în care, metoda de depunere Cold Spray, este o metodă eficientă asupra obținerii, restaurării și îmbunătățirii proprietăților materialelor de blindaje ale vehiculelor de luptă prin testarea din punct de vedere mecanic, microstructural și de rezistență la coroziune al depunerilor efectuate prin aceasta metodă.

CAPITOLUL 1. Considerații generale asupra materialelor utilizate pentru blindaje.

Principala armă de protecție a vehiculelor de luptă o reprezintă blindajul, astfel încât blindajul definește protecția oferită de acestea și de obicei este cheia supraviețuirii echipajului, dar împachetează și dimensiunile, forma și mai ales tonajul vehiculului de luptă, toate acestea putând afecta mobilitatea și capacitatea de luptă a vehiculului. În acest context, se impune un echilibru între grosimea/protecția blindajului și restul performanțelor vehiculului. Evoluția blindajului este strâns legată de rolurile îndeplinite de vehiculele de luptă, precum și de dimensiunea și tipul observa o placă de blindaj perforată de proiectile.



Figura 1.1. Placă de blindaj penetrată.

Blindajele trebuie să respecte un raport între rezistență și greutate pentru a-și păstra o manevrabilitate bună, astfel încât, cea mai groasă parte este cea frontală, unde vulnerabilitatea este crescută, lăsând celelalte zone precum blindajul părților laterale ale șasiului și turelei mai subțiri pentru a nu crește excesiv în greutate, totodată fiind și mai puțin protejate.

Pulverizarea termică este reprezentată de un grup de procese de acoperire cu scopul realizării unor straturi la care se utilizează ca materie primă pulberi, atât metalice cât și nemetalice, care pot fi depuse atât în stare topită, cât și semitopită și au diferite proprietăți în funcție de domeniul de utilizare. Aceste procese de depunere superficială se împart în trei categorii, după cum urmează:

T

Tabel 2.1. Tehnologia pulverizării termice și acronimele acesteia.

Tehnologiile de pulverizare termică			
U	Metode la rece	Metode electrice	Metode prin combustie

2

.

CGSM (pulverizare cu gaz rece)	APS (acoperire în jet te plasmă la presiune atmosferică)	Pulverizare cu flacăra
HVAF (combustibil aer de mare viteză)	VPS (pulverizare cu plasmă în atmosferă cu vacuum)	HVOF (combustibil oxigen de mare viteză)
WS (pulverizare caldă)	LPPS (pulverizare cu plasmă în atmosferă cu presiune joasă)	D-GUN (metoda tunului detonat)
CS (Cold Spray)		Pulverizare în arc

2.1. Metoda de pulverizare „Cold Spray”.

La sfârșitul anilor 1980, tehnologia de pulverizare superficială la rece, a fost dezvoltată de către Allkimov și colaboratorii săi. În urma cercetărilor realizate de aceștia în cadrul cărora au fost utilizate particule metalice, s-au concluzionat rezultate care atestă faptul că particulele, în loc să erodeze suprafața, au aderat rezultând în acoperirea acesteia.

Înaintată de către A.P. Allkimov, brevetarea acestei tehnologii de pulverizare termică la rece, a avut loc în SUA, în anul 1994, iar un an mai târziu a fost brevetată și în Europa.

Prin intermediul acestei tehnici de pulverizare superficială, jetul de material este utilizat în așa fel încât acesta nu reprezintă rezultatul arderii sau ionizării gazului utilizat în cadrul procesului. Gazul utilizat sau un amestec de gaze ce pot fi utilizate în cadrul pulverizării la rece, sunt comprimate la o presiune ce ajunge valoarea de 3.5 Mpa și la o temperatură de încălzire de până la valoarea de 700 °C. Cu ajutorul unui sistem de duze de tip Laval (convergente-divergente) în care este introdus gazul cald, acesta se distinde și atinge viteze supersonice. Pulberile sunt introduse în acest sistem de duze, după care particulele accelerate sunt depuse la valori ce se află sub punctul lor de topire.

În cadrul realizării acoperirii prin impactul particulelor cu suprafața ce este supusă pulverizării, acestea sunt supuse deformării plastice, iar viteza acestor particule „netopite” ajunge la valori de 500-1500 m/s.

Pulverizarea la rece (CS), în calitate de proces de pulverizare termică, are la bază o creștere dinamică a accelerației gazului ce atinge viteze supersonice și conduce la obținerea de energii cinetice ce cuprind valori ridicate. Dispozitivul de pulverizare împreună cu elementele ce îl compun sunt prezentate în Figura 2.1

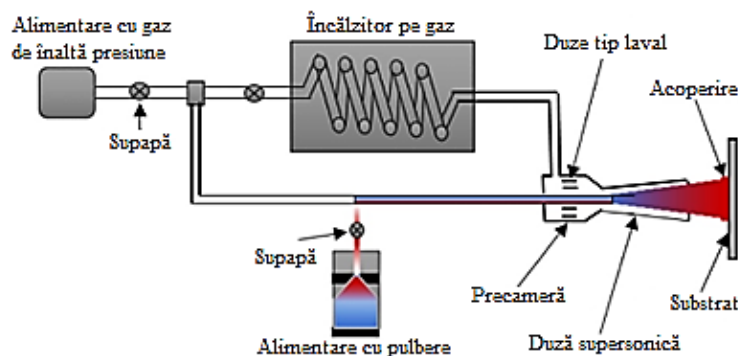


Figura 2.1. Vedere schematică a dispozitivului de pulverizare la rece (Cold Spray).

CAPITOLUL 3. Tipuri de materiale utilizate pentru îmbunătățirea proprietăților prin metoda de depunere superficială „Cold Spray”.

3.1. Proprietățile oțelului 52100, în calitate de material de bază pentru pulverizare superficială.

Acest tip de oțel, denumit ASTM A295 (52100), este aliat cu Crom și are un conținut ridicat de carbon, ceea ce îi conferă o duritate ridicată și se caracterizează prin rezistență ridicată la uzură și oboseală, reușind astfel să respecte standarde precum ASTM și SAE.

3.2. Pulberi utilizate pentru acoperiri ce îmbunătățesc proprietățile mecanice.

În scopul îmbunătățirii proprietăților mecanice au fost dezvoltate diferite tipuri de pulberi precum, (legătură), DARC-AL6061-G1H1, METCO 82VF-NS, METCO430NS etc., mai jos, detaliând

Pentru a se asigura o legătură mult mai strânsă între materialul de bază și cel de acoperire, se realizează acoperiri cu pulberi destinate special pentru crearea acestei legături, cum sunt de exemplu pulberile WIP-BC1, pe bază de carbură de crom și aglomerate cu nichel, pulberi ce prezintă un nivel ridicat de rezistență la uzură și impact, fiind special concepute pentru stabilirea acestui strat de legătură dur între substratul de bază și stratul de acoperire în care se utilizează

Pulberile WIP-C1, având la bază carbură de crom, prezintă un nivel ridicat de performanțe atât asupra rezistenței la uzură, cât și a rezistenței la impact. Pulberile sunt destinate procesului de pulverizare la rece care realizează o acoperire densă ce poate fi pulverizată atât cu heliu, cât și cu azot, putându-se obține acoperiri cu o grosime de aproximativ 6 mm, totodată, atunci când pulverizarea se realizează pe un strat dur, este necesar un substrat de legătură utilizând pulberi

CAPITOLUL 4. Metode și instalații de analiză a acoperirilor realizate prin metoda de pulverizare Cold Spray.

4.1. Instalația de depunere Cold Spray.

Sistemul de pulverizare la rece (Cold Spray) cu elementele ce îl compun, este reprezentat schematic în figura următoare (Figura 4.1.), pentru a se putea înțelege mai ușor cum sunt dispuse subsistemele și elementele ce compun instalația:

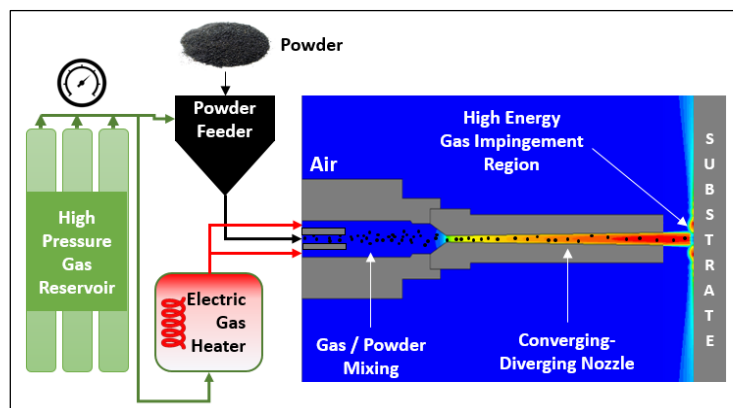


Figura 4.1. Vedere schematică a instalației de depunere Cold Spray.

4.2. Echipamente utilizate în cadrul analizelor structurale.

4.2.1. Microscopul electronic cu scanare Quanta 200 3D Dual Beam.

Facultatea de Mecanică din cadrul Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași are în dotarea departamentului de Ingineria materialelor și suprafețelor un Microscop electronic cu scanare Quanta 200 3D Dual Beam, produs de către compania Fei (Field Electron and Ion Company) [], cu un impact semnificativ pe piața producătoare a sistemelor de microscopie electronice, ale cărei origini sunt în Statele Unite, având puncte de lucru și în țări precum Franța, Germania, Olanda etc.

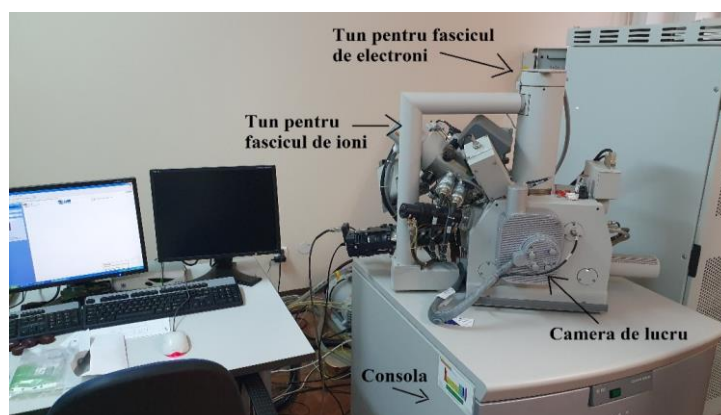


Figura 4.2. Microscop electronic cu scanare Quanta 200 3D Dual Beam din dotarea Facultății de Mecanică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.

4.2.2. Microscopia optică.

În majoritatea cercetărilor efectuate în ingineria materialelor, microscopia optică este utilizată într-un procent semnificativ, fiind un element vital al acestui domeniu. Pentru efectuarea analizelor se utilizează microscopice de tip IM și DM, regăsindu-se în dotarea laboratorului de Studiul Materialelor și Materiale Avansate din cadrul Facultății de Mecanică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.

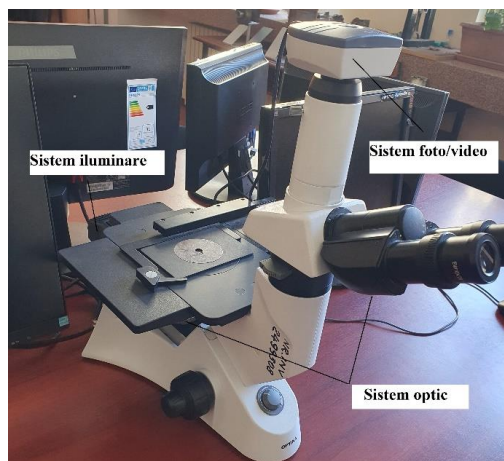


Figura 4.3. Microscop metalografic (IM 7100). Principalele elemente componente.

4.2.3. Difractometrul cu raze X.

Disponibil pentru efectuarea analizelor, difractometrul de raze X, X'Pert PRO MRD, este existent în dotarea laboratorului de Studiul Materialelor și Materiale Avansate din cadrul Facultății de Mecanică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași. Acesta este fabricat de producătorul Olandez, Malvern Panalytical

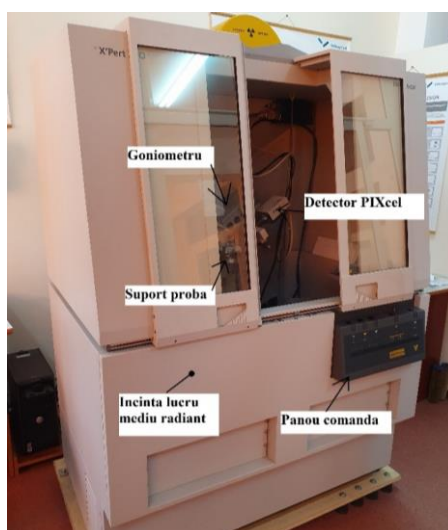


Figura 4.4. Prezentarea difractometrului de raze X, Panalytical X'Pert Pro.

4.3. Echipamente utilizate în cadrul cercetărilor proprietăților tribologice.

4.3.1. Tribometrul CETR UMT-2.

Determinarea coeficientului de frecare, a durtății și a rezistenței la microzgârieturi se realizează prin intermediul tribometrului CETR UMT-2, echipament prezent în dotarea laboratorului de Tribologie din cadrul facultății de Mecanică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.

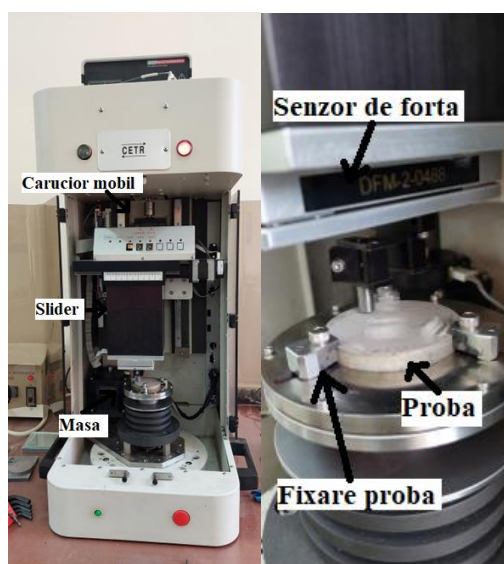


Figura 4.5. Tribometru CETR UMT-2. Vizualizarea testului de determinare a coeficientului de frecare prin mișcare de rotație.

4.3.2. Mașina de încercări Instron.

Efectuarea testelor statice și la oboseală se realizează prin intermediul mașinii de încercări INSTRON 8801, echipament prezent în dotarea catedrei de Rezistența materialelor din cadrul facultății de Mecanică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.



(a)



(b)

Figura 4.6. Mașina de încercări Instron 8801 (a), împreună cu calculatorul ce o echipează (b).

4.4. Metode și echipamente utilizate în cadrul efectuării analizelor electrochimice.

Echipament potențiostat pentru studiul de coroziune.

O metodă de caracterizare a proceselor de coroziune este potențiomtria ciclică. În această metodă se trasează curbele de polarizare, succesiv pentru valori mai întâi crescătoare și apoi descrescătoare ale potențialului electrodului de lucru, înregistrându-se curentul din circuit. Sunt mai multe moduri de reprezentare a datelor în funcție de scopul urmărit și de procesul care trebuie evidențiat.



Figura 4.7. Echipament de investigare a coroziunii asupra materialelor metalice: (a) echipament potențiostat și (b) celula de lucru.

CAPITOLUL 5. Rezultate experimentale de obținere a depunerilor superficiale prin metoda Cold Spray.

5.1. Planificarea efectuării cercetărilor experimentale.

Planificarea efectuării cercetărilor experimentale presupune parcurgerea următoarelor etape, după cum urmează:

(a) Analize microstructurale: microscopia optică; microscopia electronică SEM.

(b) Determinarea rezistenței la coroziune:

- Procese de coroziune electrochimică prin metode de testare potențiodinamică și spectroscopie de impedanță electrochimică.

(c) Analiza proprietăților mecanice: determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de rotație și translație; microindentare; microzgâriere; tracțiune; oboseală.

5.2. Depunerile efectuate prin metoda Cold Spray.

Depunerile superficiale s-au efectuat utilizând instalația de pulverizare la rece (Cold Spray) VRC Gen III (VRC Metal Systems). Efectuarea depunerilor pe probele utilizate s-a realizat prin colaborarea internațională cu Northeastern University din Boston (USA) definitivându-se un contract de cercetare „Program in materials, Additive and Secure Manufacturing and Multiscale

Materials Engineering (3ME)”, Număr de grant: W911NF2020024. Proiectul este realizat în cadrul Laboratorului de cercetare al armatei americane (DEVCOM) în colaborare cu mai multe universități și institute de cercetare: MIT, MMT, CTC, UCONN, VRC Metal Systems și Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași (TUIASI). Această colaborare conferă posibilitatea de a contribui la consolidarea informațiilor referitoare la metoda de pulverizare termică „Cold spray” și totodată, accesul la mai multe eșantioane depuse prin această metoda pe materiale utilizate în aplicații militare.

Pulberile utilizate în cadrul acoperirii probelor sunt pe bază de carbură de crom și nichel, iar tipul acesta de pulberi are denumirea de WIP-C1. În prealabil, pentru a oferi o legătură mult mai puternică între stratul depus și substratul de bază, a fost aplicată o depunere cu pulberi destinate exclusiv creării unui strat de legătură ce poartă denumirea de WIP-BC1. În Tabelul 5.1 sunt prezentați parametrii de depunere, iar în Tabelul 5.2 dimensiunile probelor.

Tabel 5.1. Parametrii de lucru pentru depunerea la rece a eșantioanelor.

Parametru	Valoare
Gaz	Azot
Presiune	6.2 MPa (900 psi)
Temperatură	675 °C
ID-ul duzei	WC NZL0060
Dimensiunea gâtului duzei	2 mm
Viteza de alimentare cu pulbere	10 rpm
Debitul de gaz de alimentare cu pulbere	105 slm
Distanța de pulverizare	25 mm
Unghiul de pulverizare	90 deg.
Viteza de trecere a duzei	250 mm/s
Distanța pasului duzei	0.25 mm
Grosimea stratului	0.127 mm
Grosimea acoperirii țintă	0.508 mm
Tip pulberi	WIP-C1
Tip pulberi substrat	WIP-BC1 la un unghi de 60°

Tabel 5.2. Dimensiuni probe.

Tip epruvetă	Dimensiuni	Destinație
Epruvetă rotundă	88 x Ø6 [L x D]	Încercare la tracțiune
Epruvetă tip paralelipiped dreptunghic	23 x 10 x 10 [L x l x h]	Microscopie optică
Epruvetă tip paralelipiped dreptunghic	64 x 20 x 10 [L x l x h]	Determinare coeficient de frecare aparent prin mișcare de translație
Epruvetă tip paralelipiped dreptunghic	20 x 10 x 10 [L x l x h]	Teste de microzgâriere (microscratch)

Epruvetă tip disc	Ø64 x 10 [D x h]	Determinare coeficient de frecare aparent prin mișcare de rotație
Epruvetă tip disc	Ø12 x 3 [D x h]	Teste de coroziune
L=lungime; l=lățime; h=înălțime; D=diametru.		

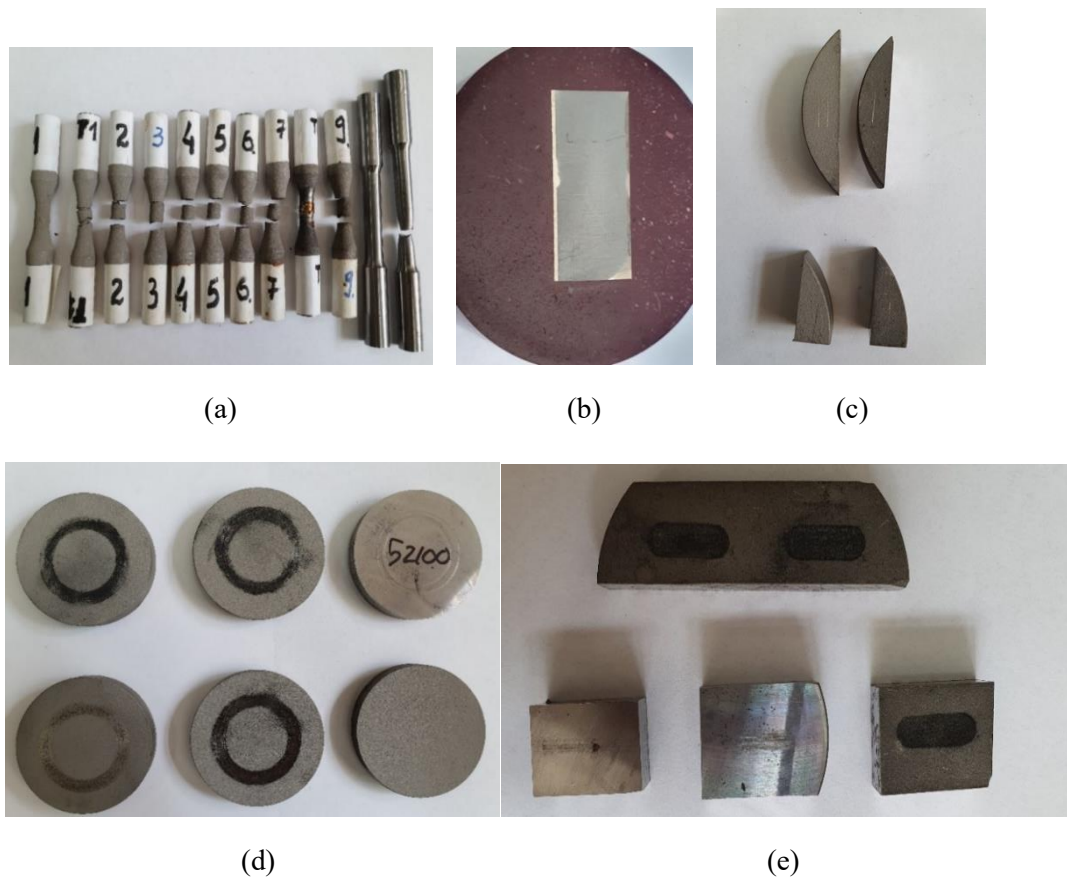


Figura 5.1. Probele utilizate pentru efectuarea analizelor de tracțiune (a); microstructurale (b); microzgâriere (c); determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de rotație și teste de microindentare (d); determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de translație (e).

5.3. Analiza structurală a straturilor superficiale depuse utilizând pulberi WIP-C1 prin metoda Cold Spray prin intermediul microscopiei optice și electronice.

Particulele de carbură de crom și aglomerate cu Ni au fost depuse pe oțelul AISI 52100. În Figura 5.3 (a,c) este prezentată suprafața materialului de bază la diferite puteri de mărire, iar în Figura 5.4 (a,e) este ilustrată morfologia depunerii în secțiune transversală. În Figura 5.4. se poate observa că particulele s-au introdus în substratul de bază, deformându-se simultan în urma ciocnirii atât particulele, cât și substratul care are o duritate mare ce crește gradul de deformare al particulelor și care totodată, a permis depunerea particulelor rezultând în obținerea unor acoperiri dense și strâns legate de suprafața substratului. În Figura 5.4 (a) se observă că suprafața depusă

este una plană, fără fisuri în materialul de acoperire sau în particulele ce se află în materialul de acoperire.

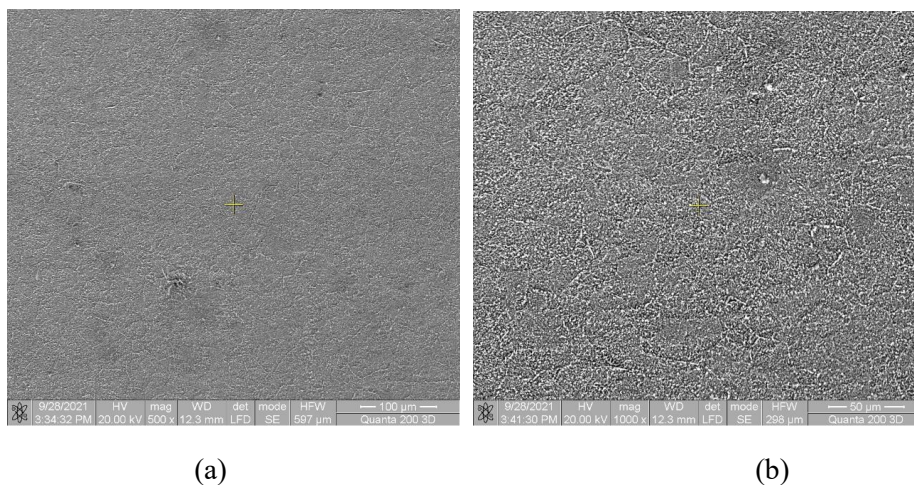


Figura 5.2. Micrografie material de bază (a) 500X; (b)1000X.

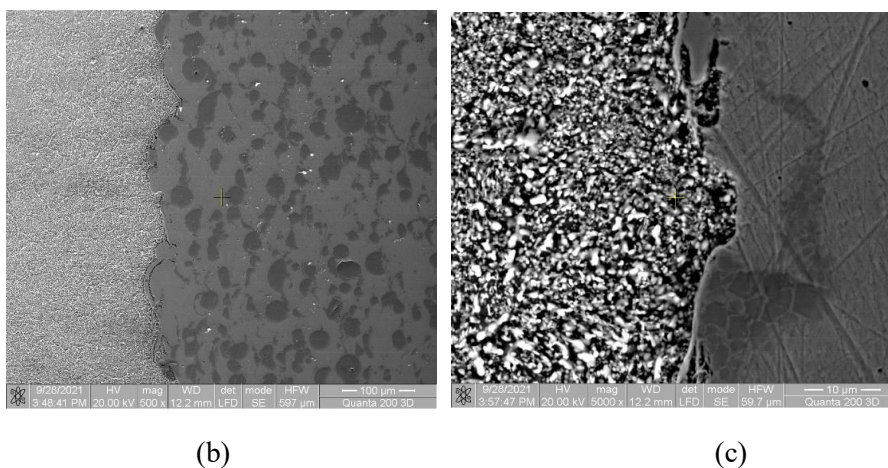
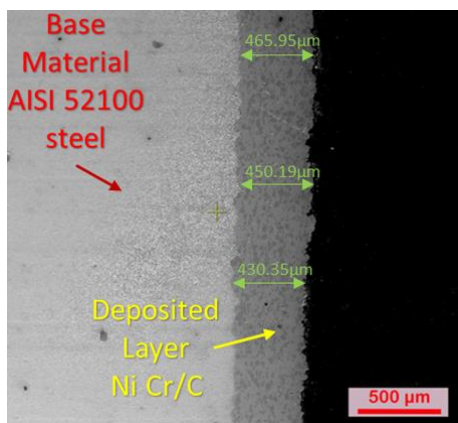


Figura 5.3. Micrografie cu vedere în secțiune transversală a materialului acoperit (a) 100X; (b)500X; și (c) 5000X.

După cum se poate observa prin aspectul morfologic al particulelor din Figura 5.5, particulele sunt de diferite dimensiuni, astfel încât s-a permis pătrunderea particulelor și deformarea substratului unde particulele de dimensiuni mici sunt propulsate la o viteză mai mare, conducând

astfel la pătrunderea mai adâncă în suprafața substratului. Dimensiunea particulelor este cuprinsă între aproximativ 17 și 66 μm (Figura 5.5. b), iar după testele EDS, compoziția chimică a fost compusă din Ni, Cr, C și O (Figura 5.5. f). Tabelul 5.3. prezintă procentul de masă al elementelor componente ale stratului depus, după testele EDS.

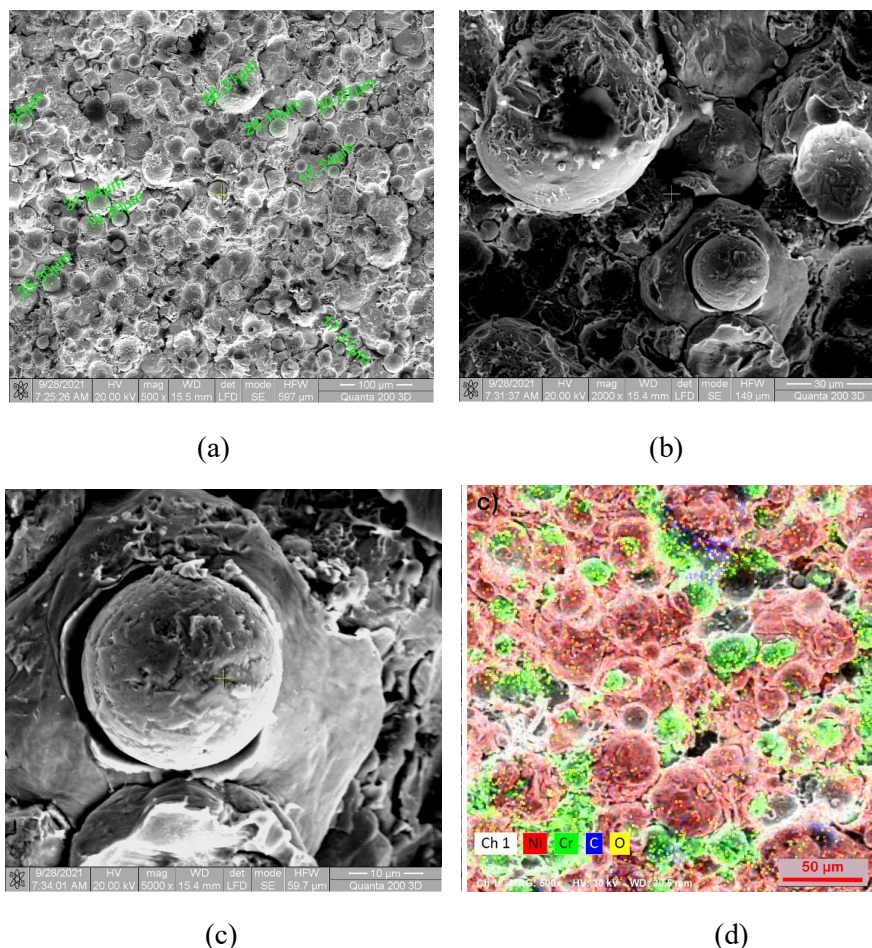


Figura 5.4. Morfologia suprafeței depunerilor superficiale (a)500X; (b) 2000X; (c) 5000X și (d) suprafața de cartografiere EDS.

Tabel 5.3. Compoziția chimică a stratului depus cu pulberi WIP-C1 determinată prin teste EDS.

Compoziție (%)	Cr (%)	O (%)	Ni (%)	C (%)
WIP-C1	22.25	3.44	57.65	16.64

Analiza structurală a straturilor superficiale a fost realizată prin difracție de raze X, astfel încât în Figura 5.6. sunt prezentate difractogramele generate atât pentru materialul de bază, cât și pentru cel de acoperire []. Din difractograme se poate observa faza predominantă de NiCr (structură cubică/ICDD 96-901-2971) care s-a obținut la o valoare a unghiului de 2 Theta de cca 44° , faza secundară a Cr₃C₂ (structură cubică/ICDD 96-901-1599) la o valoare a unghiului de 2 Theta de 53° și 77° . Din ceea ce se poate observa la materialul de bază, faza predominantă este Fe (structură cubică/ICDD 96-901-6602), la un unghi aproximativ de 2 Theta de 45° , fazele secundare fiind formate din Fe și Cr₃C₂ la o valoare a unghiului Theta de 65° și 83° .

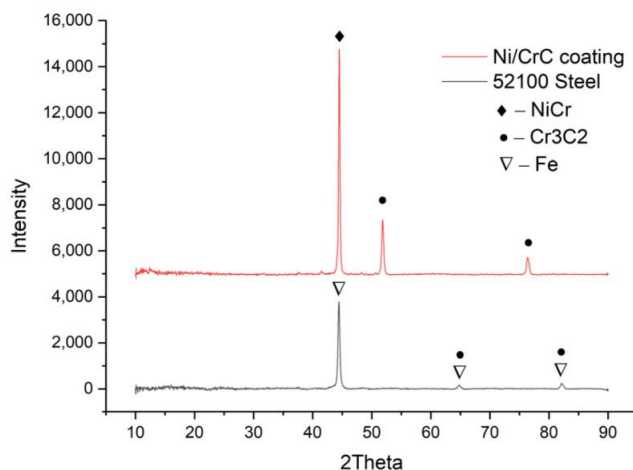


Figura 5.5. Difracție de raze X atât pentru materialul de bază, cât și pentru cel de acoperire [Error! Bookmark not defined.].

CAPITOLUL 6. Rezultate experimentale asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale depunerilor superficiale realizate prin metoda Cold Spray.

6.1. Determinarea comportamentului la oboseală.

6.1.1. Încercări la tracțiune statică.

Înainte ca probele să fie supuse solicitării (loading) de oboseală, trebuie determinate anumite caracteristici ale materialului din care sunt confecționate aceste probe. Aceste caracteristici se determină prin încercarea probelor, mai întâi la solicitarea de tracțiune statică. Este nevoie de a determina, în primul rând, limita de curgere a materialului, de la care se pornește, cu valori mai mici, în solicitarea la oboseală.

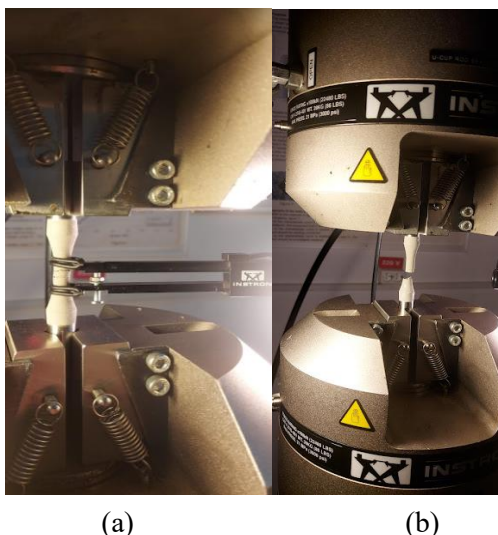
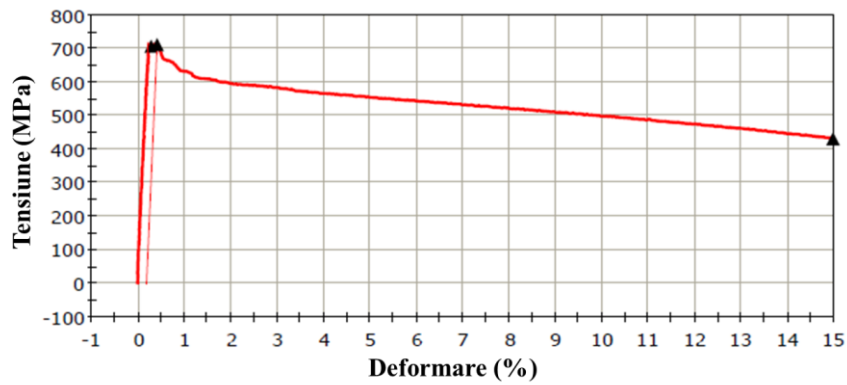


Figura 6.1. Atașarea extensometrului pentru încercarea la tracțiune statică.

Având în vedere că alungirea totală este de 15%, în final, când se ajunge la rupere, materialul de bază suferă deformații plastice semnificative, de unde și gătuirea observată în Figura 6.2. Tot din cauza alungirii totale menționate, stratul depus suferă distrugerii semnificative.



(a)



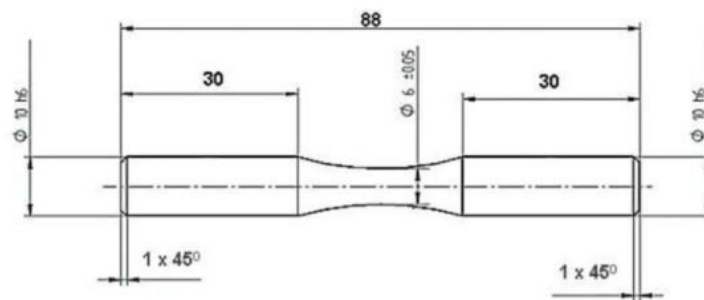
(b)

Figura 6.2. Curba tensiune - deformație specifică (a) și proba ruptă după solicitarea de tracțiune statică (b).

Se constată că tensiunea $\sigma_{p0.2}$ este de 831.6 MPa, valoare de la care se pornește cu valori descrescătoare în solicitarea la oboseală.

6.1.2. Considerații generale asupra încercărilor la oboseală

Efectuarea testelor la oboseală a fost realizată în conformitate cu standardul ASTM E466-15 (Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials), iar dimensiunile probelor pentru solicitarea la oboseală sunt prezentate în Figura 6.3.



(a)



(b)

Figura 6.3. Dimensiunile probelor pentru solicitarea de oboseală (a); forma și aspectul probelor acoperite (b).

Menționăm faptul că, principalul obiectiv a fost observarea comportării materialului de acoperire la solicitarea la oboseală și nu trasarea diagramei de durabilitate la oboseală pentru materialul de bază.

În Figura 6.4 a fost surprins momentul propagării fisurii de oboseală. Se cunoaște faptul că, în funcție de material, pot fi necesari un număr relativ mare de cicluri de oboseală pentru inițierea fisurii.

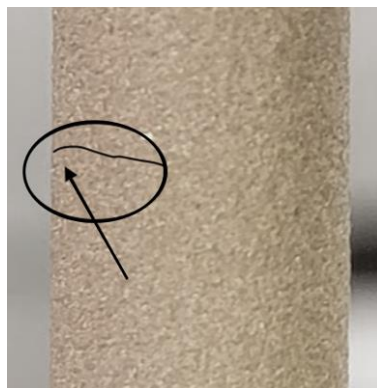


Figura 6.4. Propagarea fisurii de oboseală.

6.1.3. Determinări la oboseală efectuate asupra probelor acoperite.

Considerații preliminare privind efectuarea testelor de oboseală:

Pentru solicitarea de oboseală, au fost utilizate 9 probe, realizate din oțel 52100, Figura 6.5. Probele 1 și 8 nu s-au rupt nici după 5 milioane de cicluri, în consecință testul a fost oprit, iar probele s-au păstrat nerupte. Celelalte probe s-au rupt la tensiuni și numere de cicluri diferite.

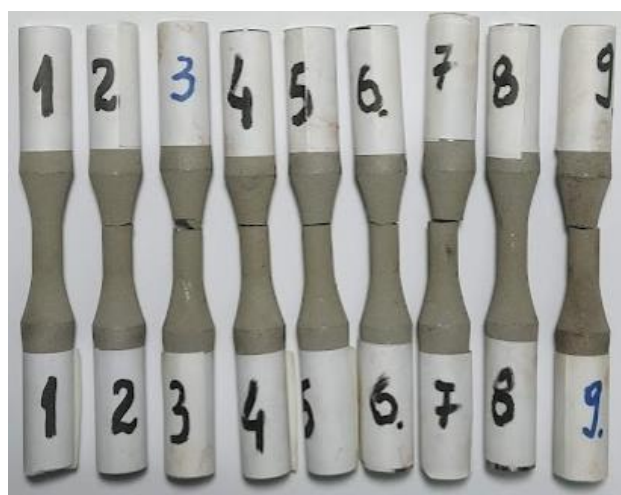


Figura 6.5. Vizualizarea probelor după efectuarea încercărilor.

Aspectul macroscopic al suprafețelor, s-a observat atât pentru probele nerupte, cât și pentru cele rupte. După cum se poate observa în Figura 6.6, nici după un număr mare de cicluri nu au rezultat detașări ale materialului depus. Este adevărat că tensiunea de încercare, în acest caz, a fost una mică, 420 MPa, relativ la limita de curgere de 852 MPa.

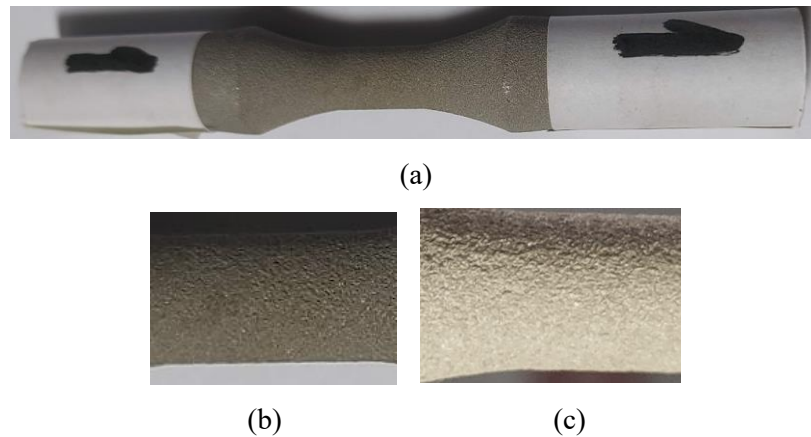


Figura 6.6. Aspectul macroscopic al probei 1 după solicitarea la oboseală (Tensiune: $\sigma = 420$ MPa, Număr cicluri: $N = 5519600$).

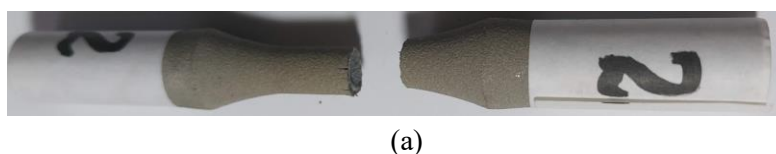
Proba nr. 2. Tensiune = 636 MPa. Număr cicluri = 5300.

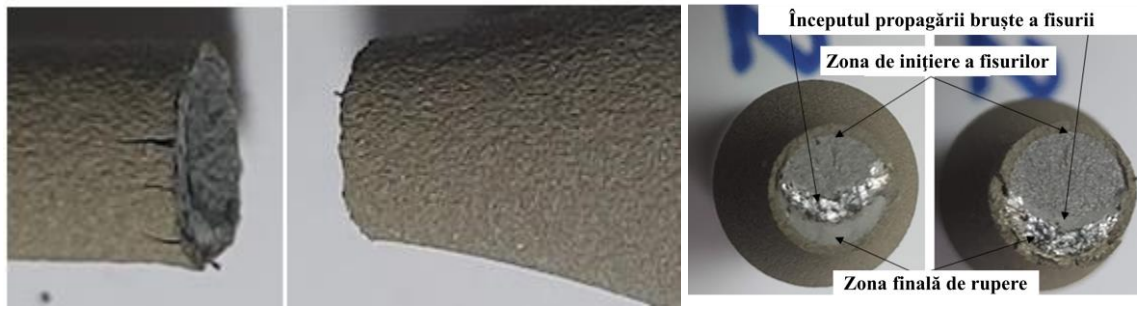
Observații macroscopice.

În zona inițierii fisurii, suprafața materialului de acoperire este plană, fără fisuri macroscopice evidente. Pe tot parcursul propagării fisurii, suprafața materialului de acoperire rămâne plană, neexistând desprinderi de material, Figura 6.7 (c). La limita dintre zonele fisurii propagate lent prin oboseală și a fisurii propagate brusc, se constată deteriorări semnificative ale materialului de acoperire, Figura 6.7, (d), (e) și (f).

Observații microscopice.

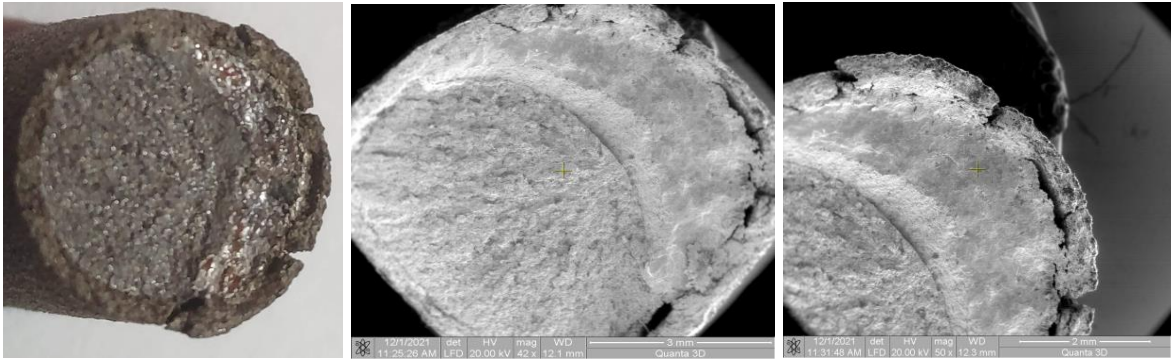
În zona de inițiere a fisurii, nu se constată deteriorări semnificative ale stratului materialului de acoperire, Figura 6.7 (g), cum ar fi desprinderi macroscopice de material, fisuri în interiorul materialului de acoperire, fisuri ale particulelor ce constituie materialul de acoperire. În schimb, în această zonă a inițierii fisurii, Figura 6.7 (g) și (h), se poate constata o deteriorare în zona materialului de acoperire cu desprinderi microscopice de material. Având în vedere că, în această zonă, la exteriorul probei nu se constată deteriorări ale materialului de acoperire, se poate concluziona faptul că fisura s-a inițiat, mai întâi în materialul de bază, după care s-a extins în ambele direcții, atât în materialul de acoperire, spre exterior, cât și în materialul de bază, spre interior. În Figura 6.7 (i) se observă o desprindere a materialului de acoperire de materialul de bază. Această desprindere se observă doar în această zonă, ceea ce ne duce la concluzia că fisura s-a inițiat aici. Desprinderea materialului de acoperire de materialul de bază s-a produs ca urmare a diferențelor dintre modulele de elasticitate ale celor două materiale, deci a diferențelor de deformare specifică.





(b)

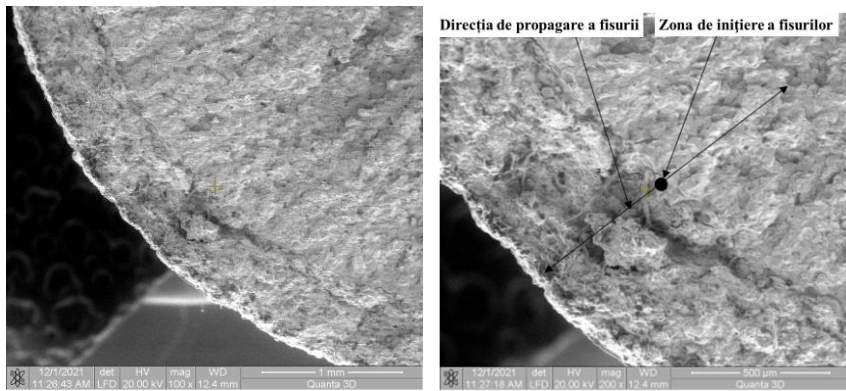
(c)



(d)

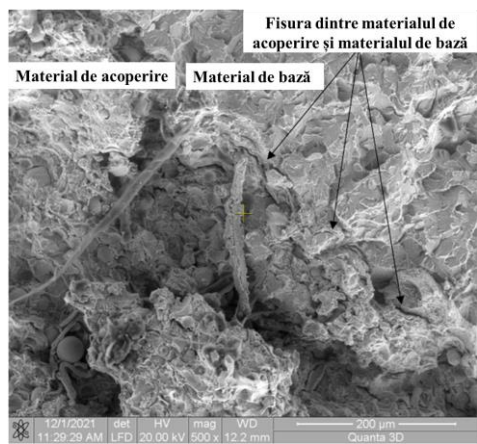
(e)

(f)



(g)

(h)



(i)

Figura 6.7. Aspectul macroscopic și microscopic al suprafețelor rupte pentru proba 2, $\sigma = 636 \text{ MPa}$, $N = 5300$ de cicluri.

Proba nr. 9. Tensiune = 446 MPa. Număr cicluri = 4424120.

Observații macroscopice

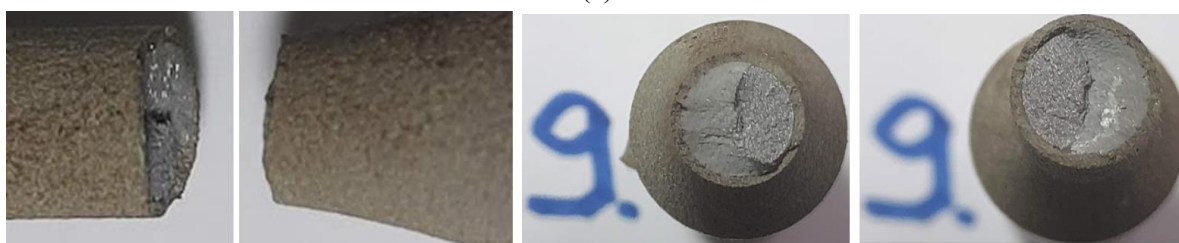
Având în vedere tensiunea mică la care a fost supusă, mai mult de 50% din suprafața de rupere este obținută prin propagarea stabilă prin oboseală a fisurii. Și aici se constată că suprafața de rupere este perpendiculară pe direcția de sollicitare, Figura 6.8 (a). Se constată, de asemenea că avem o uniformitate în ceea ce privește suprafața rezultată prin rupere a materialului de acoperire, pe toată circumferința acestuia, Figura 6.8 (b), (c) și (e). O desprindere a materialului de acoperire de materialul de bază se constată la începutul propagării bruște a frontului fisurii, Figura 6.8 (f).

Observații microscopice

În zona de inițiere a fisurii prin oboseală, nu se constată deteriorări semnificative ale materialului de acoperire, Figura 6.8 (g) și (h). Ca și la proba anterioară se observă o fisură foarte fină între materialul de bază și materialul de acoperire însemnând o desprindere între cele două materiale. La această probă, se observă, mai pronunțat decât la proba precedentă, microfisuri inter și intra-granulare, Figura 6.8 (i), în special în apropierea zonei de interfață dintre cele două materiale.

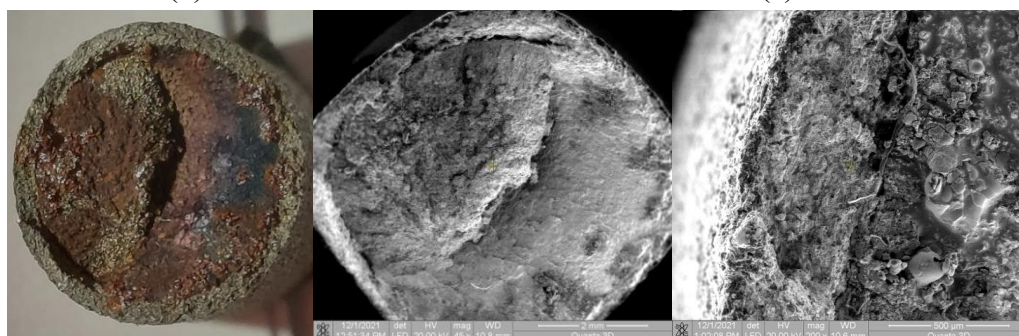


(a)



(b)

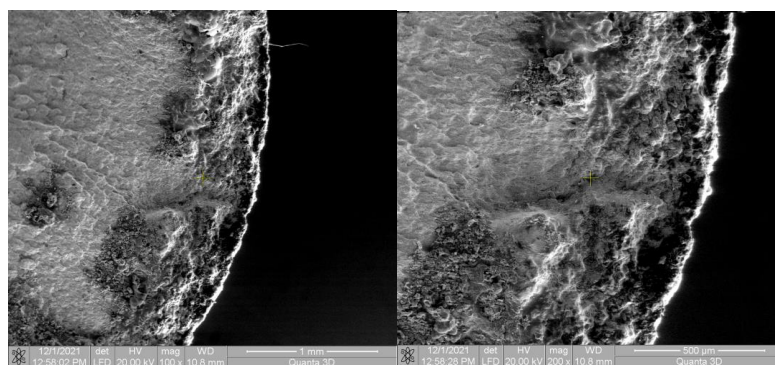
(c)



(d)

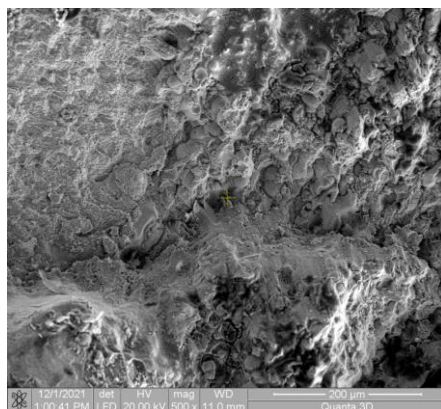
(e)

(f)



(g)

(h)



(i)

Figura 6.8. Aspectul macroscopic și microscopic al suprafețelor rupte pentru proba 9
 $\sigma = 446 \text{ MPa}$, $N = 4424120$ cicluri

Proba nr. 8. Tensiune = 438 MPa. Număr cicluri = 5451948.

Așa cum s-a menționat anterior, valoarea de 5 milioane de cicluri a fost considerată ca limită de durabilitate. Astfel, dacă pentru o anumită tensiune, proba nu se rupe după 5 milioane de cicluri, încercarea se oprește. Acesta a fost cazul probei 8, care la tensiunea de 438 MPa, după 5451948 de cicluri nu s-a rupt, iar testarea a fost oprită. Examinându-se cu atenție suprafața exterioară a probei, ca urmare, materialul de acoperire, nu s-au constatat niciun fel de deteriorări ale acestuia. Coeficientul rezultat din raportarea tensiunii de încercare la limita de curgere este: $K=438/853=0.51$. Ca urmare, la o tensiune de solicitare de aprox. 50% din valoarea limitei de curgere a materialului de bază, în condițiile în care nu apare fisurarea, materialul de acoperire rezistă la valori mari ale numărului de cicluri, neapărând deteriorări la suprafață. Această afirmație trebuie luată cu precauție, întrucât nu știm ce se întâmplă la interfața dintre cele două materiale, în zona în care apar primele deformații plastice ale materialului de bază.



(a)



(b)

Figura 6.9. Aspectul macroscopic al suprafeței exterioare a probei 8
 $\sigma = 438 \text{ MPa}$, $N = 5451948$ cicluri.

În urma testelor, s-a obținut cu ajutorul perechilor de date, tensiune de solicitare, numărul de cicluri până la rupere, diagrama Wöhler (Figura 6.10.) pentru probele nr. 8 (438MPa) și nr. 1 (420MPa) care nu s-au rupt după mai bine de 5 milioane de cicluri. Se poate observa din diagramă că limita de oboseală este la o valoare a tensiunilor de aprox. 446 MPa.

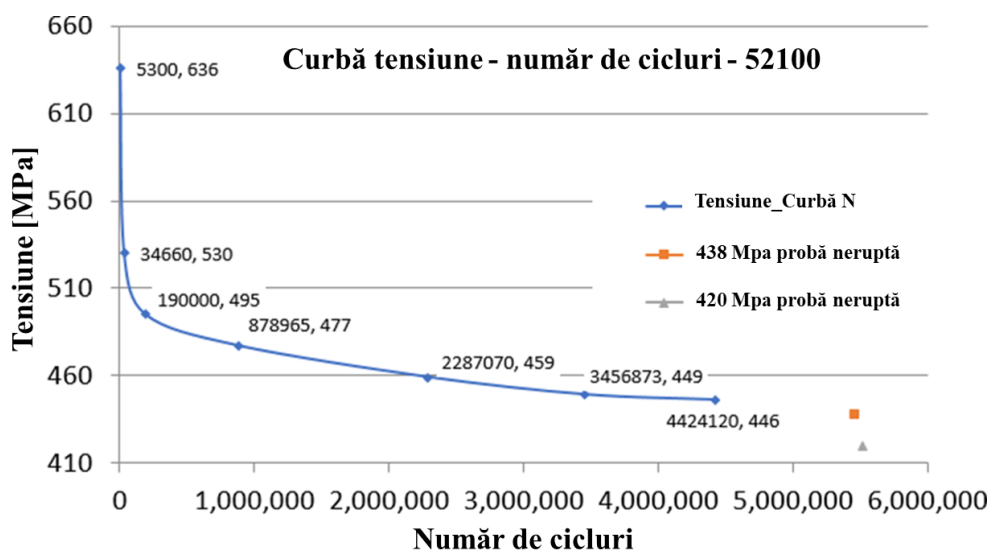


Figura 6.10. Diagrama Wöhler a materialului cu depuneri superficiale supus testului de oboseală.

6.2. Determinarea durității.

După efectuarea determinărilor s-a constatat faptul că, stratul depus conduce la o creștere a durității de la aprox. 28 HRC30 pentru materialul de bază la aprox. 45 HRC30 pentru stratul depus.

În Figura 6.11 este prezentat graficul cu valorile obținute după determinarea durității, atât pentru materialul de bază, cât și pentru materialul de acoperire.

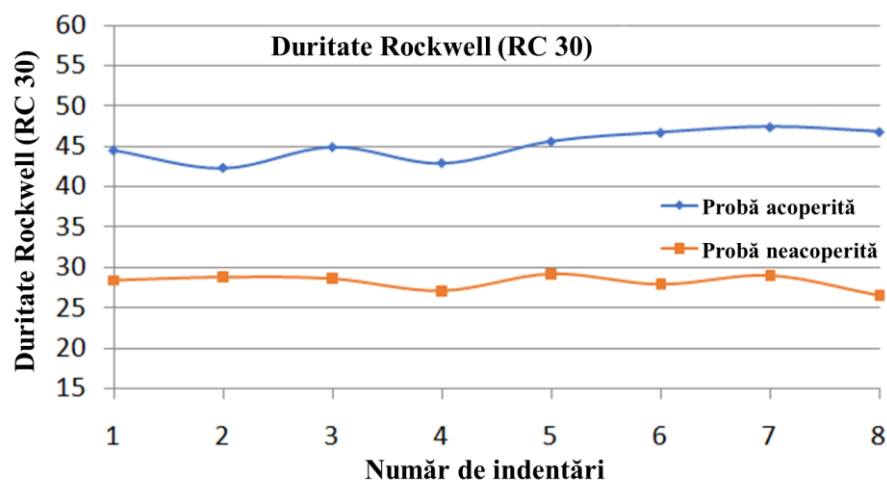


Figura 6.11. Rezultate obținute în urma determinării durezza Rockwell pentru materialul de bază (linie albastră) și materialul acoperit (linie portocalie).

6.3. Determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de translație și de rotație.

Pentru determinarea coeficientului de frecare, testele au fost efectuate atât prin mișcare de translație, cât și prin mișcare de rotație.

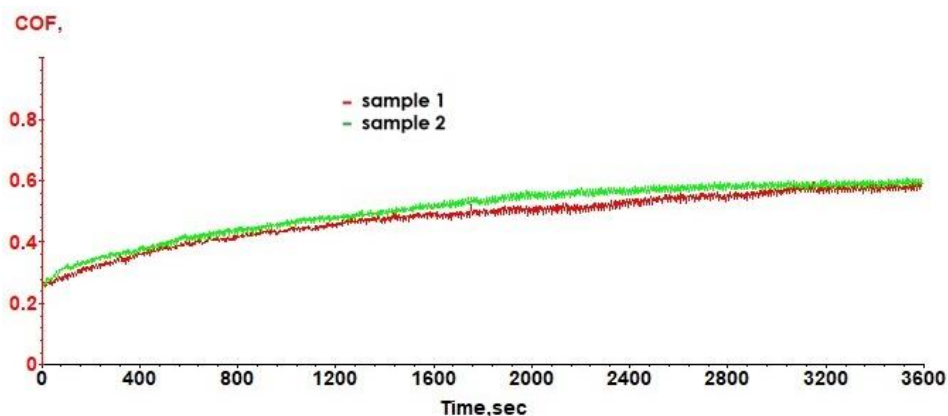
Mișcare de translație

Testele au fost efectuate atât pe probe acoperite cât și neacoperite, supuse unor forțe aplicate de 10 și 20 N. Probele neacoperite au fost testate timp de 15 minute, iar probele acoperite timp de 60 de minute cu o viteză liniară de 10 mm/s.

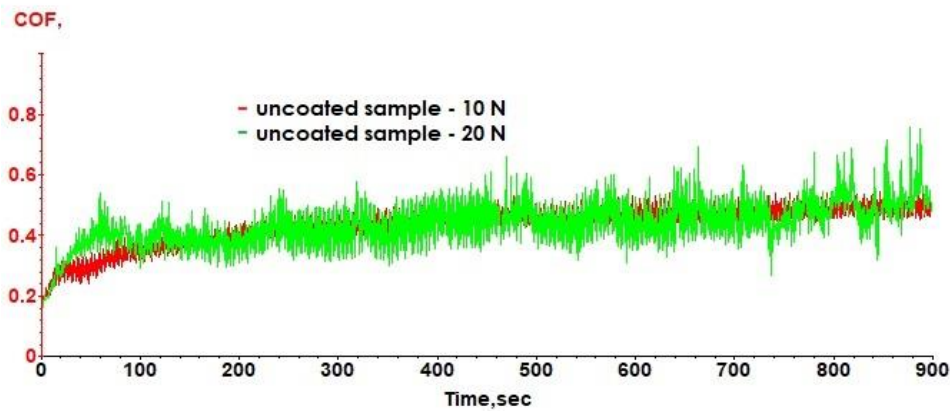
Tabel 6.1. Date obținute în urma testelor efectuate pentru determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de translație urmând standardul ASTM 132.

Probă	1	2	3	4	Neacoperit 1	Neacoperit 2
Încărcare	10	10	20	20	10	20
COF	0.572	0.594	0.653	0.648	0.434	0.435

Pentru a putea pune mai bine în evidență datele obținute pentru fiecare eșantion în parte, au fost realizate grafice suprapuse.



(a)



(b)

Figura 6.12. Grafice suprapuse pentru încercările efectuate cu privire la determinarea coeficientului de frecare prin mișcare liniară: (a) proba 1 și proba 2 la 10 N timp de 60 de minute și (b) probe neacoperite la 10 N și 20 N timp de 15 minute.

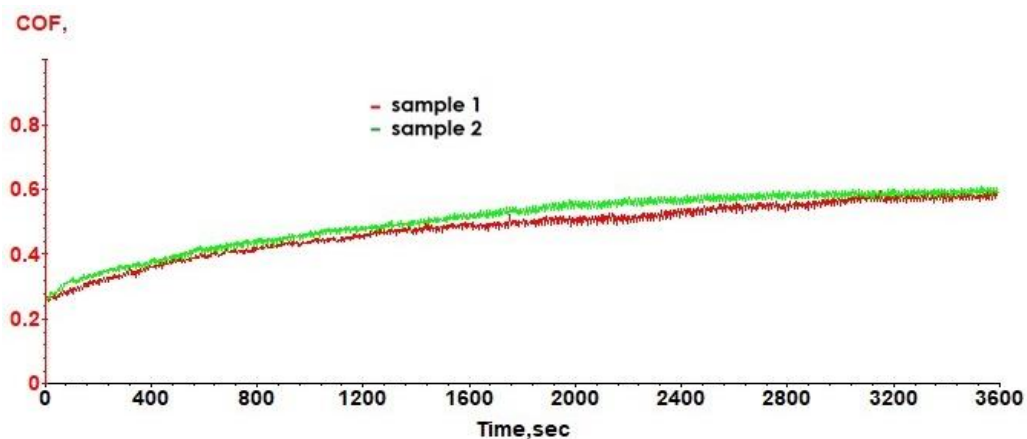
Mișcare de rotație:

Testele au fost efectuate atât pe probe acoperite, cât și neacoperite, supuse unor forțe aplicate de 10 și 20 N. Probele neacoperite au fost testate timp de 15 minute, iar probele acoperite timp de 60 de minute cu o viteză de 94.24 mm/s (viteză liniară).

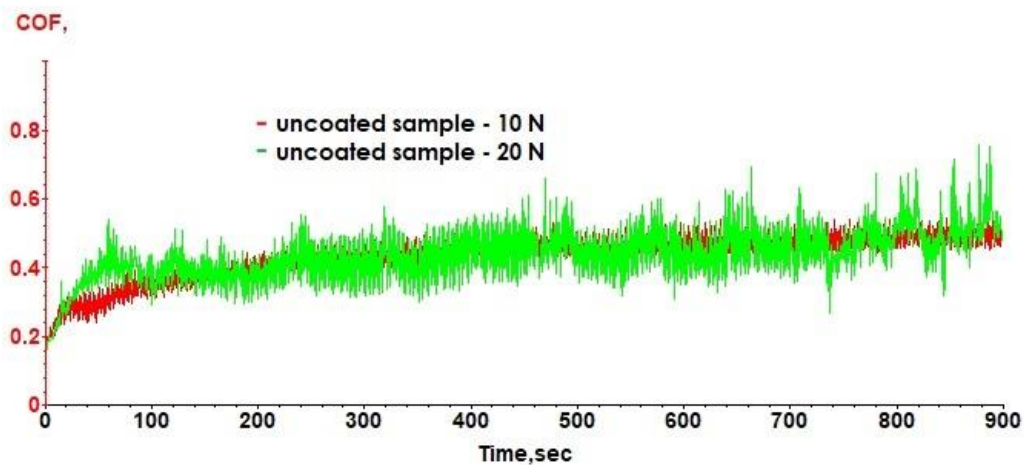
Tabel 6.2. Date obținute în urma testelor efectuate pentru determinarea coeficientului de frecare prin mișcare de rotație.

Probă	1	2	3	4	Neacoperit
Încărcare	10	10	20	20	10
COF	0.614	0.643	0.668	0.687	0.196

Pentru a putea pune mai bine în evidență datele obținute pentru fiecare eșantion în parte, au fost realizate grafice suprapuse.



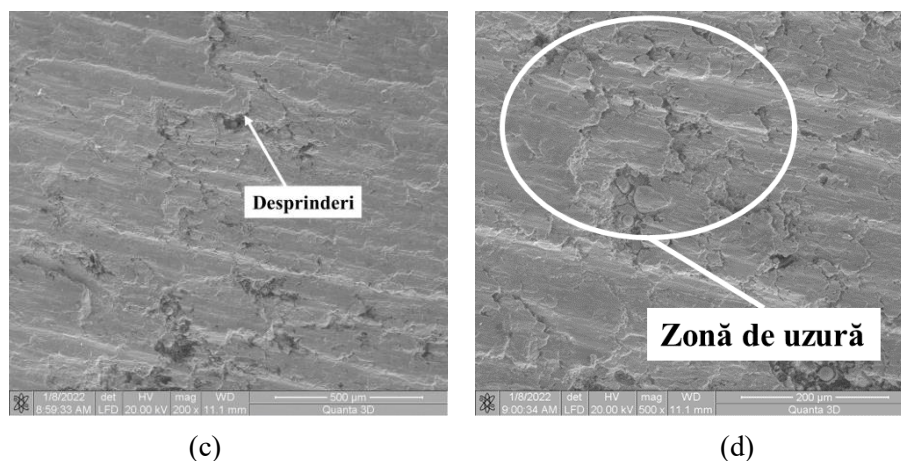
(a)



(b)

Figura 6.13. Grafice suprapuse pentru încercările de determinare a coeficientului de frecare prin mișcare de rotație: (a) proba 1 și proba 2 la 10 N timp de 60 de minute și (c) proba neacoperită la 10 N timp de 15 minute.

La începutul testelor de determinare a coeficientului de frecare, s-a observat o scurtă perioadă de tranziție deoarece aria de contact aparentă a crescut până a ajuns la o stare de echilibru și au fost îndepărtate vârfulurile mai mari ale asperităților suprafeței de acoperire. De asemenea, din imaginile SEM prezentate în Figura 6.14 se poate observa la fel, vârfulurile asperităților sunt îndepărtate, iar particulele rămase pe pista de alunecare au acționat ca un material abraziv ceea ce duce la valori mari ale coeficientului de frecare.



(c)

(d)

Figura 6.14. Imagini la diferite puteri de mărire cu suprafața probei după testele de determinare a coeficientului de frecare (a) 50X; (b) 100X; (c) 200X; (d) 500X; (e) 1000X.

6.4. Teste de microindentare și determinarea aderenței stratului prin microzgâriere (microscratch).

Microindentare:

Pentru determinarea durității au fost testate probe acoperite și neacoperite la o forță de 20 N.

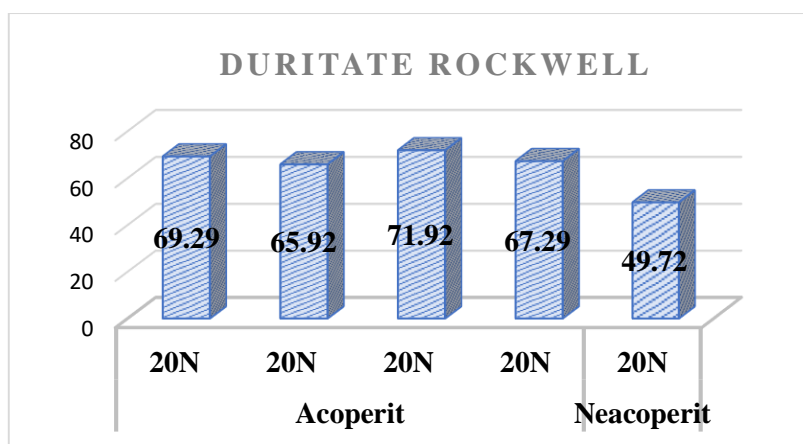


Figura 6.15. Grafic comparativ al rezultatelor obținute în urma testelor de microindentare.

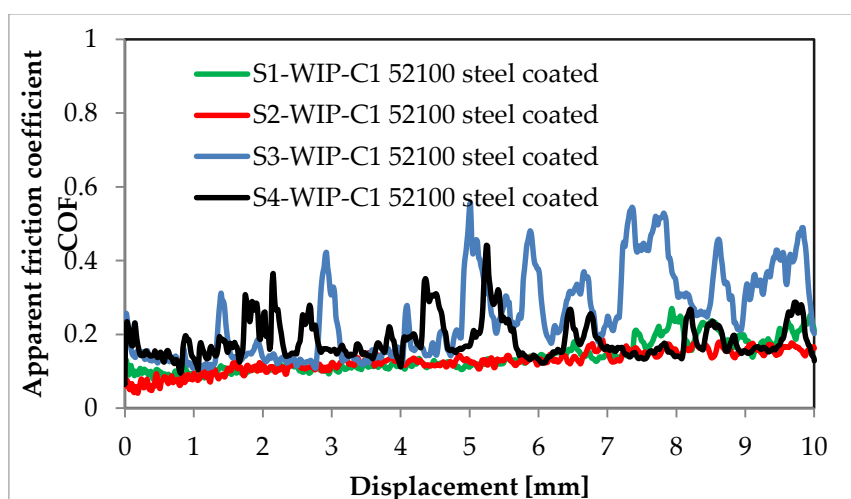
Microscratch:

Testele efectuate pentru determinarea rezistenței la microzgârieturi au fost constituite din testarea la o încărcătură liniară de la 1 la 10 N și la o încărcătură constantă de 10 N cu durata de testare este de 60 s.

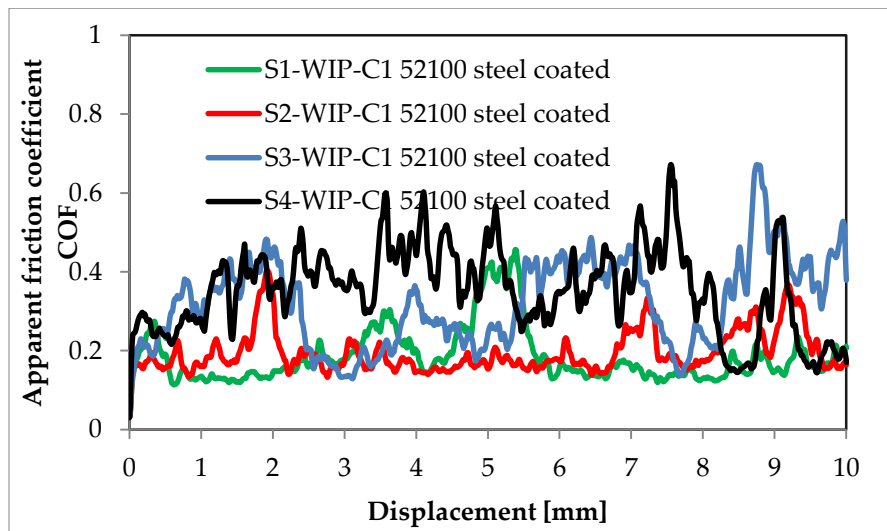
Tabel 6.3. Datele obținute în urma testării rezistenței la microzgârieturi urmând standardul ASTM D7187.

Probă	1	2	3	4
Încărcare liniară [N]				
COF	0.255	0.213	0.484	0.379
Încărcare constantă [N]				
COF	0.329	0.347	0.559	0.615

În Figura 6.16 sunt reprezentate grafice comparative în urma testelor efectuate cu privire la determinarea rezistenței la microzgârieturi.



(a)



(b)

Figura 6.16. Grafice comparative rezultate în urma determinării rezistenței la microzgârieturi: (a) eșantioane pentru sarcină liniară de la 1 la 10N și (b) eșantioane pentru sarcină constantă la 10N.

La prima vedere, probele prezintă o rezistență bună la microzgâriere deoarece variația coeficientului de frecare aparent COF cu deplasarea Y prezintă multe vârfuri. Din imaginile SEM Putem observa că lama de microzgâriere îndepărtează doar asperitățile mari ale suprafeței materialului de acoperire și acest lucru ne arată o rezistență foarte bună la microzgâriere a acoperirilor.

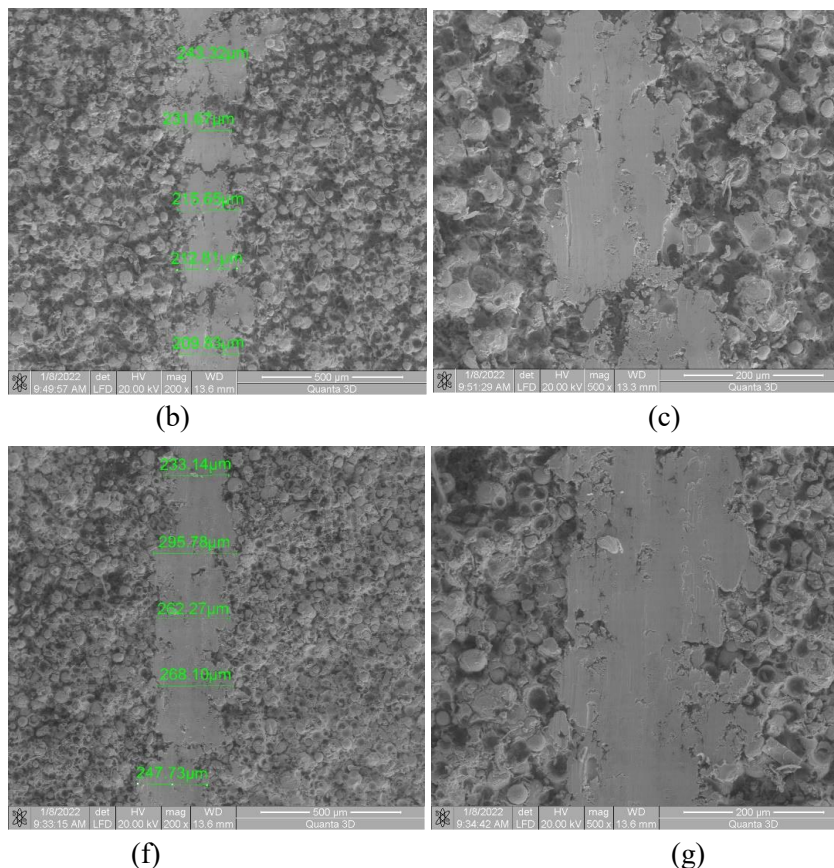


Figura 6.17. Imagini SEM în urma testării la microzgâriere la o încărcătură liniară (a) 50X ; (b) 200X; (c) 500X; (d) 1000X; și constanta (e) 50X ; (f) 200X; (g) 500X; (h) 1000X.

CAPITOLUL 7. Rezultate experimentale asupra comportamentului la coroziune a depunerilor prin metoda Cold Spray.

7.1. Determinarea comportamentului la coroziune electrochimică prin metoda potențiodinamică.

Cercetările realizate asupra proceselor de coroziune electrochimică prin testare potențiodinamică permit obținerea de informații instantanee despre vitezele de coroziune, rezistența la polarizare liniară și tehnicile de extrapolare Tafel.

Se poate observa o îmbunătățire semnificativă a rezistenței la coroziune. După cum se poate observa din Tabelul 7.1, valoarea i_{corr} de 18,37 mA pentru substrat este cea mai mare. Această diferență este confirmată și de valorile ratei de coroziune de 88,48mpy pentru 52100 neacoperit în comparație cu 18,95mpy pentru proba 52100 acoperita. Această rată mai mică se datorează stării suprafeței probei, o suprafață plană fără fisuri, confirmată în analiza microstructurală. Datorită naturii materialelor de acoperire, crom și carbură de Ni, aceste acoperiri prezintă o stabilitate chimică excelentă și rezistență la coroziune în cele mai multe medii agresive.

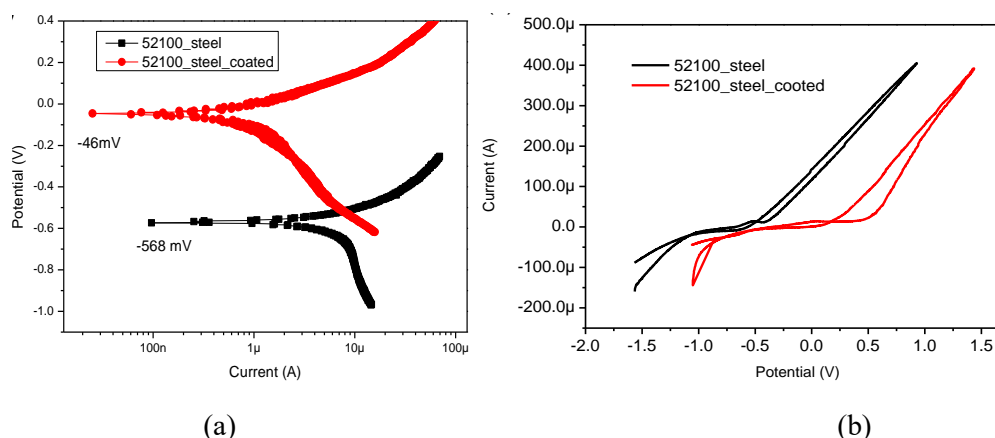


Figura 7.1. (a) Extrapolare Tafel și (b) Polarizare ciclica.

Tabel 7.1. Parametrii electrochimici obținuți din diagramele Tafel.

Probă	E_0 (mV)	i_{corr} (mA)	Rată de coroziune (mpy)
52100 neacoperit	- 568	18.37	88.48
52100 acoperit	- 46	3.9	18.95

7.2. Determinarea comportamentului la coroziune electrochimică prin spectroscopie de impedanță electrochimică.

Figura 7.2 prezintă diagramele Bode și Nquist obținute în soluție de ploaie acidă $HNO_3-H_2SO_4$.

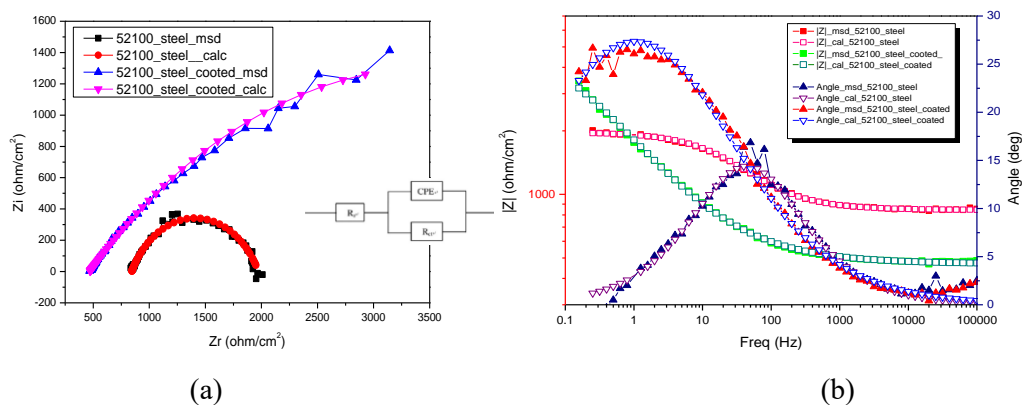


Figura 7.2. Diagramele Nquist (a) și Bode (b) pentru oțelul 52100 acoperit și neacoperit.

Tabel 7.2. Parametrii simulați ai potrivirii circuitului echivalent EIS.

Probă / Parametru	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE ($S.s^n/\text{cm}^2$)	n	R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)
52100 neacoperit	843	0.0000276	0.8	1130
52100 acoperit	469	0.000233	0.5034	6301

Datele de capacitate obținute din EIS pot fi utilizate pentru a determina filmul pasiv compact, care este legat de rezistența și capacitatea filmului pasiv. Valoarea obținută pentru R_{ct} crește de la 1130 ($\Omega \text{ cm}^2$) la 6301 $\Omega \text{ cm}^2$ pentru o proba 52100 acoperită. Acest lucru poate fi atribuit probabil protecției stratului depus.

Analiza spectrochimică. Material de bază (oțel aliat AISI 52100).

La nivelul materialului metalic se poate observa că suprafața este corodată, prezentând compuși chimici de coroziune ce par a fi de altă natură față de oțel fiind apreciați ca fiind probabil oxizi și carbonați. Coroziunea se creează pe întreaga suprafață a probei ca o generalizare a acesteia și prin mai multe investigații se poate stabili natura acesteia.

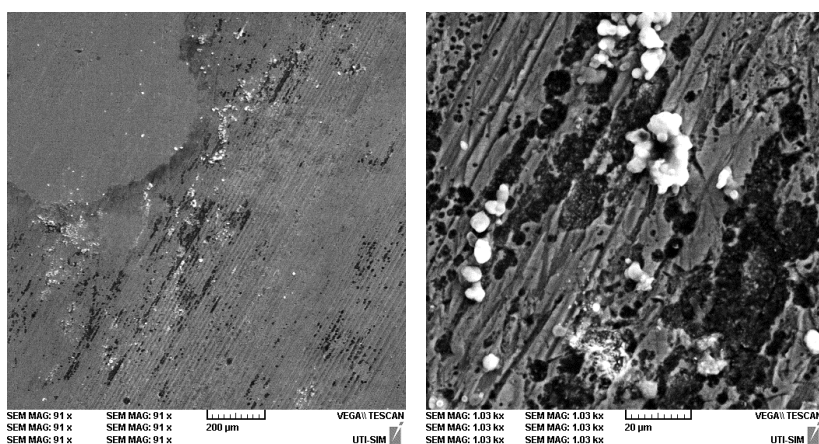


Figura 7.3. Imagini SEM ale suprafeței prin potențial de circuit deschis (OCP), potențiometrie liniară și ciclică (LP și CP) și spectroscopie de electro-impedanță (EIS).

Tabel 7.3. Compoziția chimică a suprafeței după testele electrochimice.

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1sigma)	rel. error [%] (1sigma)
Iron	26	136520	94.03	92.96	81.88	2.41	2.57
Oxygen	8	1056	2.55	2.52	7.75	0.81	31.86
Nitrogen	7	374	2.41	2.38	8.38	0.87	35.92
Chromium	24	3704	1.50	1.48	1.40	0.08	5.341
Manganese	25	1188	0.66	0.65	0.58	0.07	10.79
		Sum	101.15	100	100		

Analiza spectrochimica. Material acoperit cu pulberi Ni-Cr/C (WIP-C1).

Prin testele de electro-coroziune la scară micro, se observă că suprafața stratului superficial depus cu pulberi WIP-C1 este intactă. Din soluția de electrolit, doar câțiva compuși sunt prezenți pe suprafața depusă și sunt rezultatul interacțiunii dintre soluție și sistemul metalo-ceramic. Figura 7.4 prezintă imagini SEM ale suprafeței după potențial de circuit deschis (OCP), potențiometrie liniară și ciclică (LP și CP) și spectroscopie de electroimpedanță (EIS).

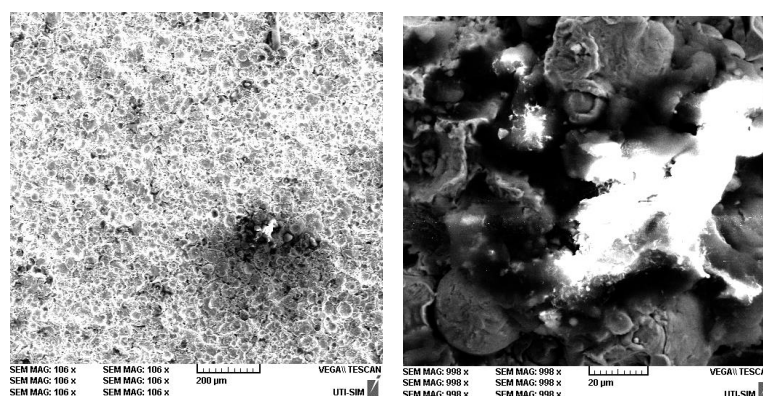


Figura 7.4. Imagini SEM ale suprafeței prin potențial de circuit deschis (OCP), potențiometrie liniară și ciclică (LP și CP) și spectroscopie de electroimpedanță (EIS).

Pe suprafața probei la microscară, se pot observa puțini compuși. Prin analiza compoziției chimice, pe lângă elementele care alcătuiesc stratul depus (Cr, Ni, Si și C), se identifică elemente în cantități mici precum azotul, oxigenul și sulfurul.

Tabel 7.4. Compoziția chimică a suprafeței după teste electrochimice.

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1sigma)	rel. error [%] (1sigma)
Nickel	28	84670	80.83	69.62	56.99	2.05	2.53
Chromium	24	49486	27.16	23.39	21.62	0.75	2.76
Nitrogen	7	602	4.68	4.03	13.84	1.36	29.05
Oxygen	8	729	2.25	1.94	5.83	1.12	49.55
Silicon	14	1060	1.11	0.96	1.64	0.11	9.94
Sulfur	16	68	0.04	0.04	0.06	0.02	64.32
		Sum	116.09	100	100		

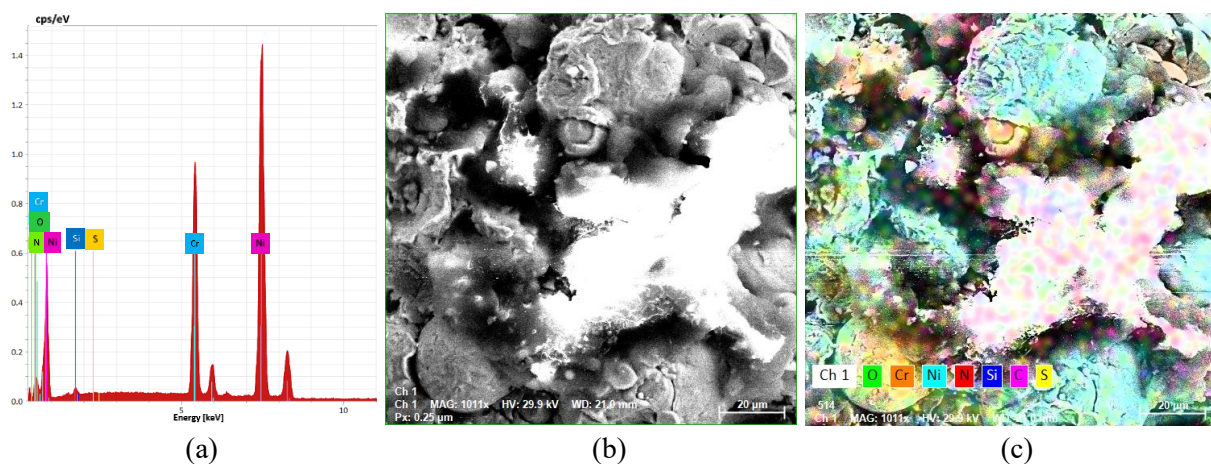


Figura 7.5. Spectrul de energie al elementelor identificate pe suprafața corodată în urma testului EIS (a) și distribuția elementală pe suprafața corodată (toate elementele) (b) și (c).

CAPITOLUL 8. Concluzii finale, contribuții personale, direcții viitoare de cercetare și diseminarea rezultatelor cercetării.

8.1. Concluzii finale.

1. Cercetările realizate arată că Ni/CrC formează o acoperire stabilă pe oțel aliat 52100 atunci când este depus prin tehnica de pulverizare la rece. Analiza microstructurală arată că învelișurile sunt dense și strâns legate de suprafața substratului și prin ciocnirea și deformarea simultană dintre particule și substratul de bază, particulele sunt introduse adânc, realizând această conexiune puternică printr-un fenomen de interblocare mecanică.

2. În urma testelor de oboseală, prin analiza macroscopică și microscopică, au rezultat următoarele: evidențierea zonei propagării prin oboseală în timp îndelungat și zona de propagare bruscă a fisurii urmată de ruptura probei; zona de propagare a fisurii este caracterizată de o structură fină specifică deteriorării bruște determinată de particulele mai grosolane; s-a constatat că, la nivelul dintre materialul de acoperire și cel de bază nu sunt pori sau fisuri semnificative; fisurile au ca stadiu incipient suprafața materialului de bază, urmată apoi de materialul de acoperire și, respectiv, interiorul materialului de bază; în faza de începere a fisurării, nu au fost observate detașări ale materialului de acoperire datorate de acesta; materialul depus s-a comportat foarte bine pe întreaga zonă de propagare a fisurii nerezultând detașări ale acestuia; Detașări ale materialului depus se pot observa la nivelul propagării bruște a fisurilor, fiind existente goluri și detașări ce se justifică prin valorile mari ale deformațiilor create de diferența mare a deformațiilor specifice ale materialului de bază și a materialului de acoperire. Proba nr. 8 a reușit să depășească valoarea de referință, astfel încat, testul a fost oprit la o valoare a tensiunilor de 438 MPa și un nr. de 5451948 de cicluri fără a se observa deteriorări ale materialului depus sau detașări ale acestuia, dar trebuie menționat faptul că, nu se poate aprecia starea suprafețelor dintre materialul de bază și cel de acoperire, unde apar primele deformații la nivelul materialului de bază.

3. Duritatea materialului a crescut de la 28 HRC pentru materialul de bază până la 45 HRC pentru stratul depus.

4. Testarea de microzgâriere a arătat că stratul de Ni/CrC are o rezistență bună la microzgâriere, deoarece coeficientul de frecare a arătat o variabilitate mare de-a lungul traseului de alunecare cu valori medii mai mari de 0,2. Din imaginile SEM, se poate observa că lățimea pistei de zgârietură este de aproximativ 260 μm , zgârieturile fiind doar pe materialul de acoperire, iar materialul de bază nu este afectat. Se poate observa că lama îndepărtează doar asperitățile mari ale acoperirii, ceea ce confirmă obținerea unei bune rezistențe la microzgârieturi.

5. Coeficientul de frecare aparent al acoperirilor a fost determinat, atât prin mișcare liniară, cât și de rotație. O scurtă perioadă de tranziție a fost observată la începutul ambelor teste, deoarece aria de contact aparentă a crescut până a ajuns la o stare de echilibru și a aplatizat vârfuluri mari ale asperităților acoperirii. Particulele libere cresc coeficientul de frecare, explicându-se valorile COF cuprinse între 0.4 și 0.7. Imaginile SEM arată că au fost îndepărtate vârfuluri asperităților și că particulele rămase pe pista de alunecare au acționat ca un material abraziv, conducând la valori mari ale coeficientului de frecare.

6. S-a obținut o îmbunătățire semnificativă a rezistenței la coroziune, aceasta fiind determinată pentru probele acoperite, atât prin metoda potențiometricii liniare, cât și prin testele EIS. Caracterul pasiv, stabil, neporos și nefisurat al învelișului a fost demonstrat prin obținerea unor valori scăzute ale vitezei de coroziune și printr-o rezistență ridicată a protecției stratului superficial depus. Acest lucru este confirmat și de starea suprafeței după testele de coroziune, unde se observă că suprafața acoperirii rămâne intactă.