

Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara (anexa la procesul verbal de avizare interna nr. 7/09.12.2024)
Cod fiscal : RO 3041226

De acord,
DIRECTOR GENERAL

Dr. Ing. Nicușor-Alin SÎRBU

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM

Dr. Ing. Horia-Florin Dașcău

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 16N / 2023

Proiectul: Sistem de acoperire nanocompozit pentru energie regenerabilă

Faza: 4: Concepere program experimental și efectuarea de cercetări experimentale privind fabricația avansată a stratului absorbant solar

Termen de încheiere a fazei: 09.12.2024

1. Obiectivul proiectului:

OS1: Validarea în laborator a unei noi tehnologii de obținere a unor sisteme de acoperire nanocompozite utilizate pentru creșterea performanțelor componentelor critice pentru producția de energie regenerabilă sau pentru protecția altor componente exploatare în condiții de solicitări termice și mecanice severe

OS2: Îmbunătățirea capacităților de cercetare aplicată prin dezvoltarea infrastructurii de cercetare, intensificarea cunoștințelor interdisciplinare și a experienței în dezvoltarea de sisteme de acoperire nanocompozite cu performanțe optice superioare, rezistență termică și mecanică îmbunătățită.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

R1: 8 studii / rapoarte;

R2: 1 site proiect;

R3: 24 articole științifice dintre care 2 open acces;

R4: dezvoltarea infrastructurii de cercetare: upgrade 2 echipamente;

R5: organizare 2 workshopuri;

R6: Participare la 2 conferințe internaționale;

R7: Participare la 2 târguri internaționale;

R8: 4 Cereri de brevete de invenție / soluții la nevoile societale;

R9: 3 tehnologii;

R10: 1 produs, sistem de acoperire nanocompozit pentru energie regenerabilă, validat în condiții de laborator.

3. Obiectivul fazei:

Concepere și implementare program experimental privind fabricarea avansată a unor straturi depuse cu proprietăți absorbante și testarea acestora în condiții de laborator

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

R1: 1 studiu / raport

R3: 4 articole științifice

R5: 1 workshop

R8: cerere brevet de invenție / soluție la nevoie societală

R9: 1 tehnologie

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

CAPITOLUL 1: Introducere

Capitolul 1 oferă o introducere detaliată în tehnologia de pulverizare termică cu viteză ridicată oxigen-combustibil (HVOF). Sunt prezentate principiile fundamentale ale acestui proces, care implică arderea unui amestec de combustibil și oxigen la presiuni înalte pentru a crea un jet de gaz cu viteză foarte mare, ce transportă particule de material în formă de pulberi spre suprafața substratului. Sunt discutate aspecte-cheie, precum influența parametrilor de pulverizare asupra comportamentului particulelor, proprietățile microstructurale și tribologice ale acoperirilor HVOF, precum și proprietățile optice ale peliculelor subțiri de TiO_2 și Al_2O_3 obținute prin acest procedeu. De asemenea, se subliniază importanța eforturilor de colaborare între mediul academic, industrie și guvern pentru dezvoltarea și implementarea inovativă a tehnologiei HVOF în diverse aplicații industriale. Capitolul oferă o perspectivă amplă asupra stadiului actual al cercetărilor în domeniul acoperirilor realizate prin pulverizare termică HVOF, prezentând progresele și potențialul acestei tehnologii avansate.

CAPITOLUL 2: Proiectarea programului experimental pe probe din oțel termorezistent cu straturi depuse din Al_2O_3 3TiO_2 , realizate cu procedeul de pulverizare termică HVOF

Capitolul 2 oferă o privire aprofundată asupra proiectării programului experimental, axat pe probele din oțel termorezistent acoperite cu straturi de Al_2O_3 3TiO_2 prin procedeul de pulverizare termică HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel). În acest capitol, se detaliază materialele utilizate, incluzând oțelul termorezistent 10CrMo9.10, care servește ca material suport și amestecul de pulberi Al_2O_3 3TiO_2 (Metco 6203) folosit pentru stratul de acoperire. Se subliniază avantajele caracteristice ale procedeului HVOF, precum viteza mare a particulelor, temperatura de lucru relativ scăzută, randamentul ridicat de depunere și îmbunătățirea aderenței. Pentru pulverizarea termică, s-a utilizat un echipament HVOF specializat, modelul pistol 2700 DJM DJ9W.

Programul experimental factorial a inclus evaluarea diverselor funcții obiectiv pe probele din oțel acoperite, cum ar fi rezistența la exfoliere, rezistența de aderență a stratului, coeficientul de frecare, grosimea stratului, rugozitatea suprafeței, duritatea stratului, precum și proprietățile de absorbție / reflexie a suprafeței. Această analiză amănunțită stabilește baza experimentală pentru evaluarea performanțelor straturilor de acoperire obținute prin pulverizare termică HVOF, asigurând o înțelegere clară și detaliată a modului în care acești parametri influențează comportamentul și eficiența acoperirilor pe oțel termorezistent.

CAPITOLUL 3: Implementarea programului experimental pe probe din oțel termorezistent cu straturi depuse din Al_2O_3 3TiO_2 , realizate cu procedeul de pulverizare termică HVOF. Rezultate și discuții

Capitolul 3 oferă o descriere exhaustivă a implementării programului experimental și a metodelor de evaluare utilizate, subliniind importanța optimizării parametrilor de proces pentru obținerea straturilor depuse de înaltă calitate. În cadrul acestui capitol, sunt descrise o serie de încercări specifice esențiale pentru caracterizarea precisă a proprietăților materialelor investigate.

3.1 Încercarea la zgâriere a stratului depus

Încercarea la zgâriere este o metodă utilizată pentru a caracteriza aderența și rezistența la zgâriere a unui material sau a unui strat de acoperire. În timpul testului, un penetrator cu vârf de diamant este tras peste suprafața materialului cu o sarcină uniform crescătoare, lăsând o urmă de zgâriere pe proba cu material depus.

În tabelul **3.1.1** se prezintă rezultatele încercării la zgâriere a straturilor depuse în cadrul programului experimental.

Tabelul 3.1.1: Rezultatele încercării la zgâriere

| Marcaj probă | Forța normală la atingerea substratului F_n [mN] | Forța tangențială la atingerea substratului F_t [mN] | Coeficientul de frecare μ [-] |
|--------------|---|---|--------------------------------------|
| 1 | 7466,06 | 582,80 | 0,078 |
| 2 | 7723,35 | 1019,16 | 0,132 |
| 3 | 4725,66 | 605,59 | 0,163 |

| | | | |
|----|---------|--------|-------|
| 4 | 4274,59 | 387,64 | 0,049 |
| 5 | 5031,81 | 556,69 | 0,167 |
| 6 | 3468,02 | 636,76 | 0,048 |
| 7 | 6876,43 | 818,13 | 0,124 |
| 8 | 7237,70 | 724,60 | 0,057 |
| 9 | 5304,44 | 694,46 | 0,141 |
| 10 | 5449,01 | 787,50 | 0,184 |

3.2 Încercarea la aderență a stratului depus

În cadrul programului experimental s-au efectuat încercări pentru determinarea rezistenței la aderență la tracțiune a straturilor depuse pe epruvete specializate. Scopul încercării este de a stabili rezistența legăturii dintre materialul depus și metalul suport.

Rezultatele încercărilor de aderență a straturilor depuse cu pulberea din $Al_2O_3 \cdot 3TiO_2$ se prezintă în **tabelul 3.2.1**.

Tabelul 3.2.1: Rezultatele încercării de aderență a straturilor depuse

| Marcajul epruvetei | Forța maximă F [N] | Rezistenței de aderență prin încercarea la tracțiune R_{ad} [N/mm ²] | Rezistenței de aderență medie $R_{ad\ med}$ [N/mm ²] |
|--------------------|--------------------|--|--|
| 1.1 | 19723,70 | 40,18 | 38,76 |
| 1.2 | 18324,65 | 37,33 | |
| 2.1 | 16557,74 | 33,73 | 34,58 |
| 2.2 | 17394,82 | 35,44 | |
| 3.1 | 19596,84 | 39,92 | 38,04 |
| 3.2 | 17746,57 | 36,15 | |
| 4.1 | 16444,38 | 33,50 | 21,92 |
| 4.2 | 5072,28 | 10,33 | |
| 5.1 | 21354,89 | 43,50 | 39,60 |
| 5.2 | 17522,62 | 35,70 | |
| 6.1 | 20672,73 | 42,11 | 42,00 |
| 6.2 | 20559,55 | 41,88 | |
| 7.1 | 14873,68 | 30,30 | 23,15 |
| 7.2 | 7856,89 | 16,01 | |
| 8.1 | 17165,24 | 34,97 | 35,40 |
| 8.2 | 17586,33 | 35,83 | |
| 9.1 | 19471,54 | 39,67 | 38,54 |
| 9.2 | 18362,56 | 37,41 | |
| 10.1 | 15310,62 | 31,19 | 35,41 |
| 10.2 | 19452,56 | 39,63 | |

3.3 Măsurători de grosime a stratului depus

Măsurătorile de grosime a stratului depus de Al_2O_3 3TiO_2 pe suport din oțel termorezistent 10CrMo9.10 au fost efectuate utilizând un microscop optic model Nikon SMZ745T. Acest microscop este echipat cu o cameră video MshOt MS 60, care preia imaginile ale probei. Imaginile preluate sunt apoi prelucrate și analizate cu ajutorul unui software specializat, asigurând astfel o evaluare precisă și detaliată a grosimii stratului depus. Valorile măsurătorilor de grosimi ale straturilor depuse, se prezintă în **tabelul 3.3.1**.

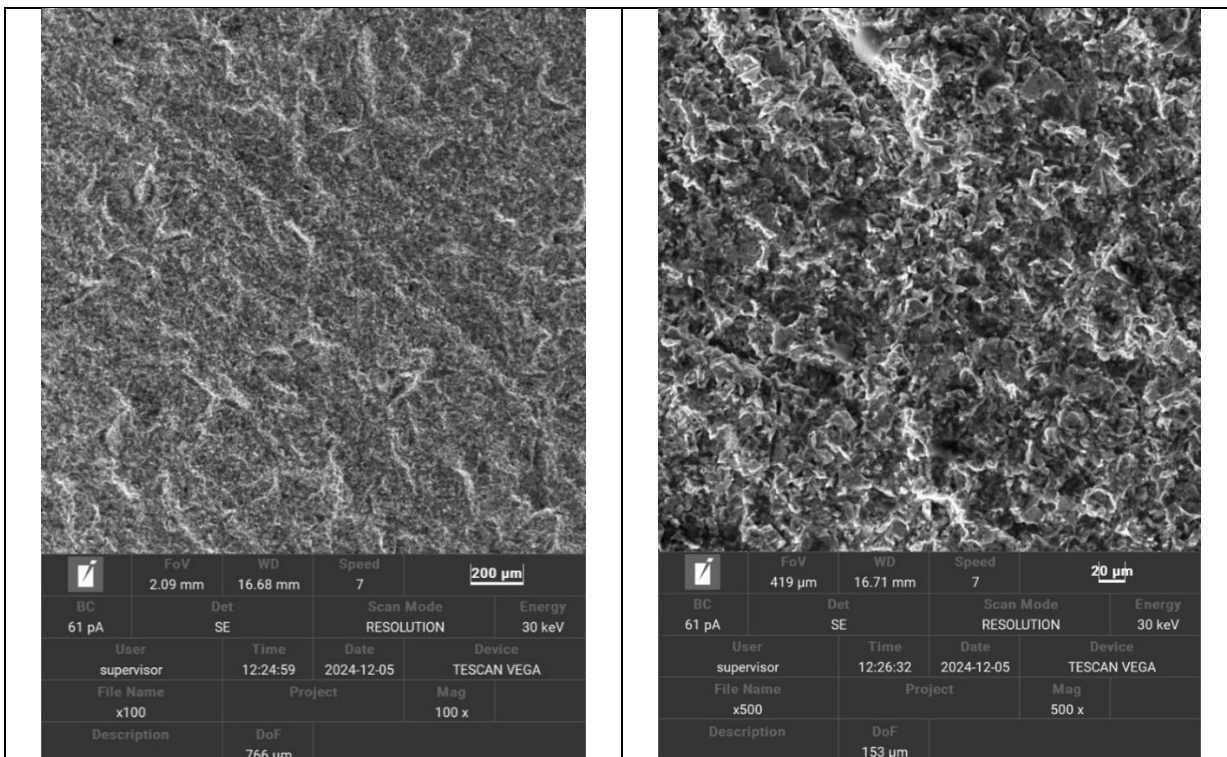
Tabelul 3.3.1: Valorile grosimii stratului depus Al_2O_3 3TiO_2 prin procedeul HVOF

| Marcaj probă | Grosime strat depus [μm] – valori măsurate | | | Grosime medie [μm] |
|--------------|---|------|------|---------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 15,6 | 22,6 | 10,2 | 16,1 |
| 2 | 32,0 | 40,0 | 35,0 | 35,7 |
| 3 | 15,1 | 10,7 | 19,9 | 15,2 |
| 4 | 28,0 | 26,0 | 30,0 | 28,0 |
| 5 | 16,6 | 14,6 | 13,2 | 14,8 |
| 6 | 10,0 | 14,7 | 18,7 | 14,5 |
| 7 | 14,4 | 16,2 | 16,2 | 15,6 |
| 8 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 |
| 9 | 26,0 | 23,0 | 23,0 | 24,0 |
| 10 | 20,0 | 19,0 | 21,0 | 20,0 |

3.4 Influența parametrilor HVOF asupra morfologiei straturilor depuse. Analiza chimică locală

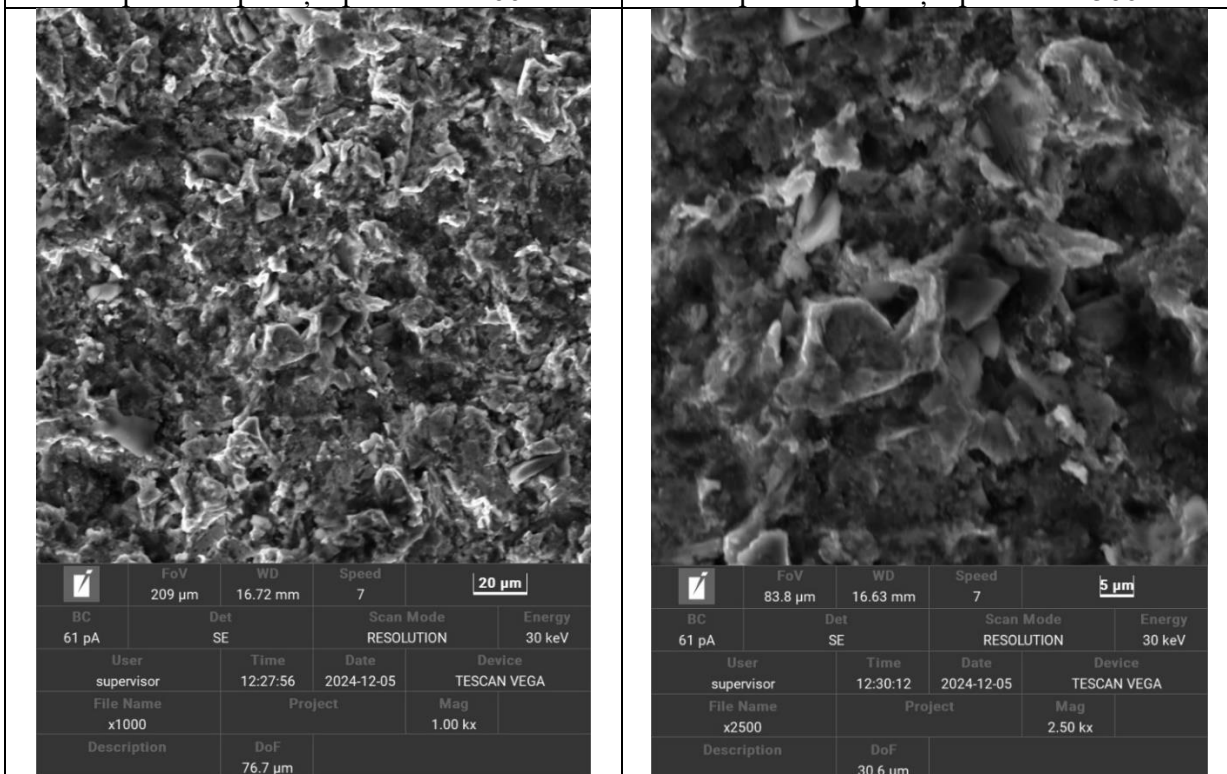
3.4.1 Examinarea suprafeței probei prin microscopie electronică de scanare

Microscopia electronică de scanare (SEM) este o metodă avansată care creează imagini ale unei probe prin scanarea suprafeței acesteia cu un fascicul focalizat de electroni. Electronii interacționează cu atomii probei, generând semnale ce oferă informații detaliate despre topografia și compoziția chimică a suprafeței. Probele cu straturi depuse au fost analizate în condiții de vid înalt la temperatură ambiantă. SEM prezintă avantaje semnificative față de microscopia optică, printre care se numără: mărire și rezoluție superioare, capacitatea de a genera imagini tridimensionale ale suprafeței probei, oferind o perspectivă detaliată asupra topografiei și morfologiei acesteia, și posibilitatea de a combina tehnica SEM cu spectroscopia de dispersie a energiei (EDX) pentru identificarea și analiza elementelor chimice prezente în probă.



Aspectul suprafeței probei 1 - 100x

Aspectul suprafeței probei 1 - 500x



Aspectul suprafeței probei 1 - 1000x

Aspectul suprafeței probei 1 - 2500x

Figura 3.4.1: Aspectul suprafeței stratului de Al_2O_3 3TiO_2 depus prin pulverizare termică cu procedeul HVOF - proba 1

3.4.2 Analiza chimică locală

Microscopul SEM este echipat cu un modul EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis), care permite analiza compoziției chimice elementare a probei. **Figura 3.4.11** prezintă compoziția chimică locală în zona particulelor de oxid de aluminiu și oxid de titan, precum și compoziția chimică medie pe o suprafață mai extinsă a stratului depus.

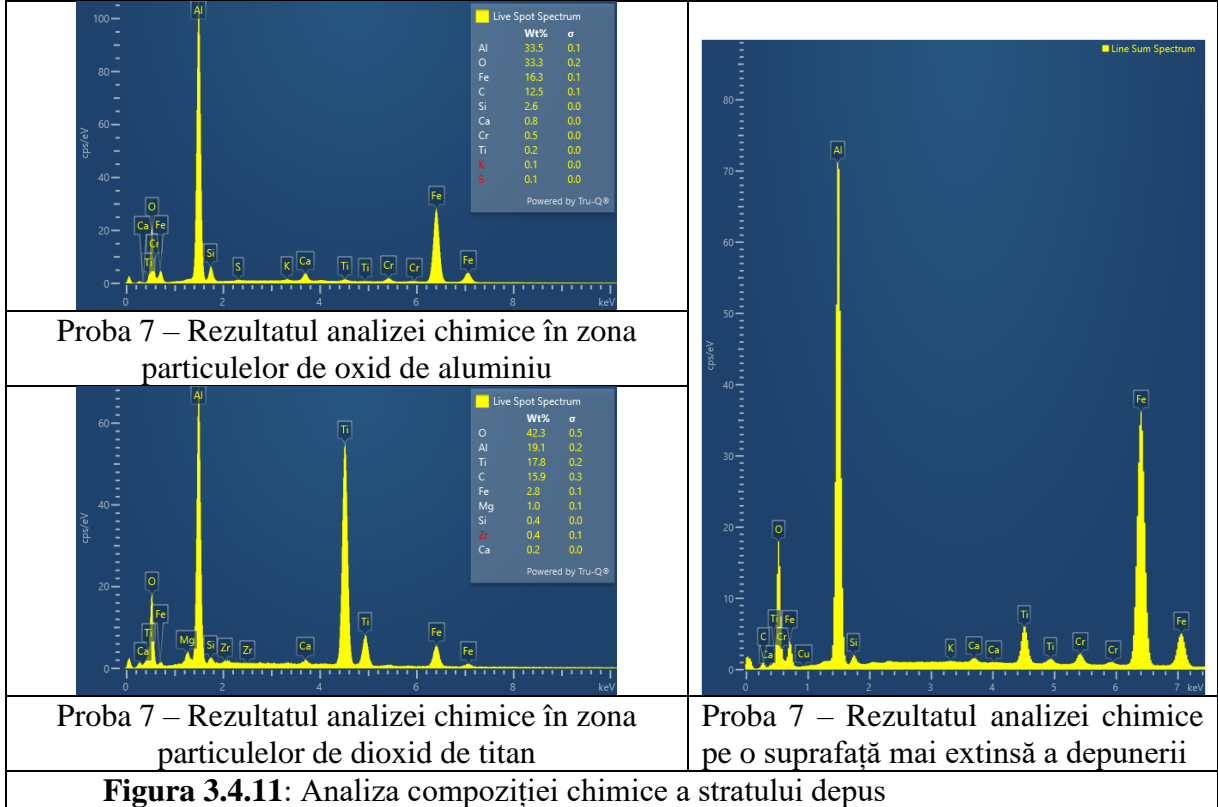
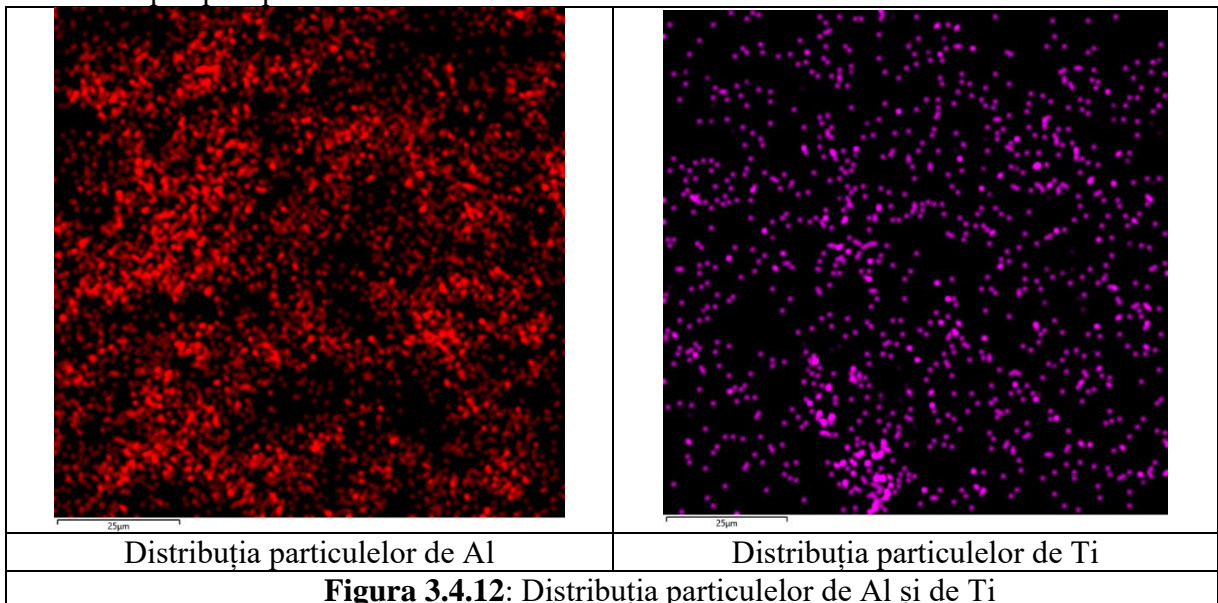


Figura 3.4.11: Analiza compoziției chimice a stratului depus

În **Figura 3.4.12** se prezintă distribuția particulelor de aluminiu și titan, pe suprafața stratului depus prin pulverizare termică HVOF.



3.4.3 Măsurarea rugozității suprafeței straturilor depuse

Determinarea rugozității straturilor depuse s-a realizat cu ajutorul aparatului Mitutoyo SJ-201P. Valorile măsurate ale rugozității straturilor depuse se prezintă în **tabelul 3.4.1** și **tabelul 3.4.2**.

Tabelul 3.4.1: Valorile rugozității (Ra) a suprafeței probelor cu depuneri de Al_2O_3 3TiO₂

| Marcaj probă | Rugozitate medie (Ra) – valori măsurate | | | | | Valoare medie Ra |
|--------------|---|------|------|------|------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 6,60 | 9,53 | 8,32 | 6,86 | 5,59 | 7,38 |
| 2 | 7,04 | 6,42 | 6,94 | 7,52 | 6,44 | 6,87 |
| 3 | 5,46 | 5,31 | 5,89 | 6,59 | 5,77 | 5,80 |
| 4 | 6,96 | 5,56 | 6,41 | 6,12 | 6,49 | 6,31 |
| 5 | 5,66 | 7,56 | 6,61 | 7,40 | 7,39 | 6,92 |
| 6 | 6,54 | 6,43 | 7,04 | 5,22 | 5,69 | 6,18 |
| 7 | 6,51 | 7,64 | 4,96 | 6,85 | 6,04 | 6,40 |
| 8 | 6,71 | 7,01 | 6,31 | 6,42 | 7,36 | 6,76 |
| 9 | 7,02 | 7,09 | 7,17 | 7,68 | 7,76 | 7,34 |
| 10 | 7,22 | 5,77 | 4,39 | 4,66 | 5,96 | 5,60 |

Tabelul 3.4.2: Valorile rugozității (Rz) a suprafeței probelor cu depuneri de Al_2O_3 3TiO₂

| Marcaj probă | Rugozitate Rz – valori măsurate (înălțime medie a rugozității) | | | | | Valoare medie Rz |
|--------------|--|-------|-------|-------|-------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 1 | 40,07 | 37,02 | 37,09 | 31,80 | 38,95 | 36,99 |
| 2 | 38,03 | 34,57 | 35,02 | 33,27 | 39,88 | 36,15 |
| 3 | 34,13 | 44,58 | 31,63 | 34,09 | 48,78 | 38,64 |
| 4 | 37,96 | 26,62 | 46,80 | 46,91 | 43,45 | 40,35 |
| 5 | 44,40 | 34,31 | 34,33 | 32,49 | 36,17 | 36,34 |
| 6 | 45,94 | 36,57 | 40,11 | 38,91 | 49,98 | 42,30 |
| 7 | 42,93 | 37,99 | 32,56 | 33,40 | 36,65 | 36,71 |
| 8 | 46,77 | 35,17 | 26,85 | 40,50 | 40,05 | 37,87 |
| 9 | 38,76 | 40,60 | 36,51 | 39,71 | 41,30 | 39,38 |
| 10 | 32,95 | 32,97 | 25,71 | 38,47 | 29,21 | 31,86 |

3.5 Analiza spectroscopică a stratului depus

Spectroscopia UV-Vis (Ultraviolete-Visibile) este o tehnică analitică puternică utilizată pentru a obține spectrele de absorbție ale unei substanțe, fie în soluție, fie în formă solidă. Procesul spectroscopic observat constă în absorbția energiei luminoase sau a radiației electromagnetice, care excita electronii din starea lor fundamentală în prima stare excitată singlet a compusului sau materialului. Spectrul electromagnetic în regiunea UV-Vis acoperă o gamă de energii de la 1,5 eV la 6,2 eV, corespunzând unor lungimi de undă între 800 nm și 200 nm. În **tabelul 3.5.1** se prezintă coeficienții de absorbție medii în domeniul spectral 200 - 800 nm. În figura 3.5.14 se prezintă spectrul de absorbție strat depus aferent probei 3, cu cel mai ridicat coeficient de absorbție.

Tabelul 3.5.1 - Coeficienți de absorbție medii K-M la probe depuse prin pulverizare termică

| Marcaj probă | Coeficienți de absorbție medii K-M (domeniu spectral 200 - 800 nm) |
|--------------|---|
| 1 | 5,083 |
| 2 | 2,108 |
| 3 | 10,333 |
| 4 | 2,625 |
| 5 | 4,708 |
| 6 | 2,650 |
| 7 | 5,833 |
| 8 | 4,125 |
| 9 | 3,750 |
| 10 | 4,083 |

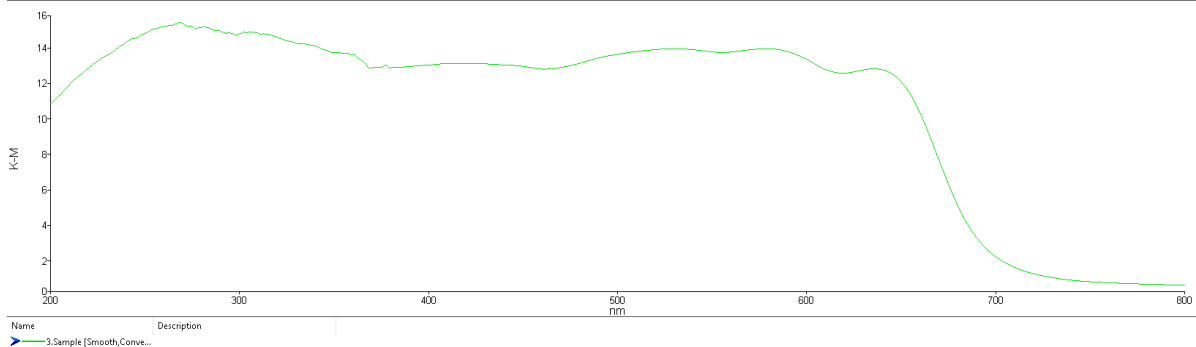


Figura 3.5.14: Spectrul de absorbție strat depus Al₂O₃ 3TiO₂ – proba 3

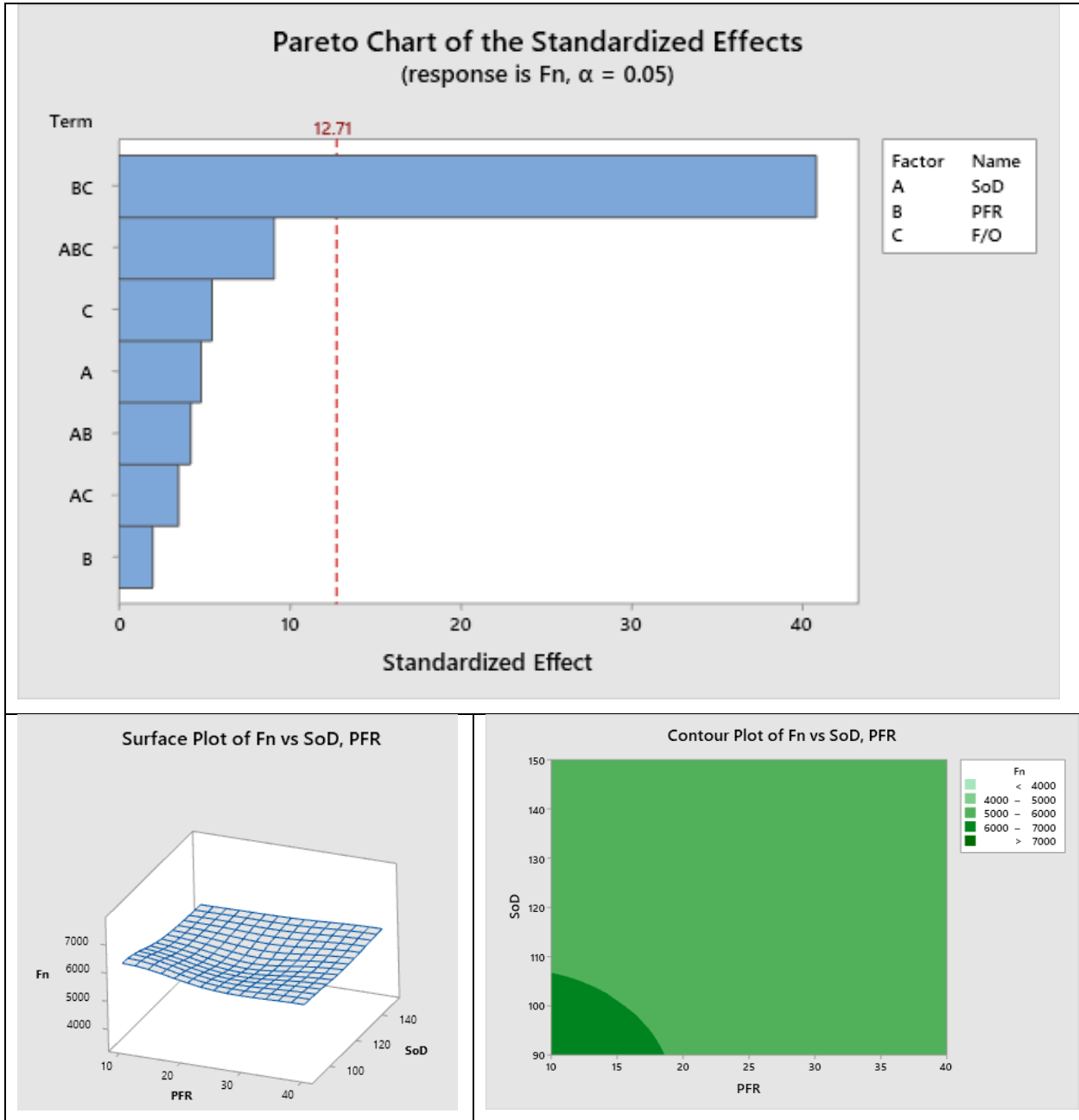
3.6 Corelații între parametrii HVOF, structură și proprietăți. Tehnologie optimizată destinată realizării de straturi depuse din Al₂O₃ 3TiO₂, realizate cu procedul de pulverizare termică HVOF

3.6.1 Corelații între parametrii HVOF, structura și proprietățile stratului depus

Pentru a stabili o corelație precisă între parametrii procesului de pulverizare termică HVOF, cum ar fi distanța de pulverizare (SOD – Stand off Distance), debitul de pulbere (PFR – Powder Feed Rate) și raportul combustibil/oxigen (F/O – Fuel/Oxygen), și principalele funcții obiectiv: rezistența de aderență a stratului depus la substrat, (R_{ad}), coeficientul de absorbție K-M a stratului depus, forța normală de zgâriere (F), coeficientul de frecare (μ), rugozitatea suprafeței (R_z), și grosimea stratului depus (Gs), s-a utilizat un software avansat de analiză statistică. Acest software a permis analizarea detaliată a datelor experimentale colectate, identificând relațiile dintre variabilele de proces și rezultatele obținute. Prin aplicarea tehnicilor statistice, s-au putut identifica corelații semnificative care au condus la o înțelegere mai profundă a modului în care parametrii HVOF influențează caracteristicile stratului depus.

Corelația dintre forța la zgâriere normală F_n și SOD, PFR și F/O este descrisă de ecuația 3.6.3:

$$F_n = 7554 + 53,20 \text{ SOD} - 77,1 \text{ PFR} + 1715 \text{ F/O} - 1,857 \text{ SOD} \cdot \text{PFR} - 899,6 \text{ SOD} \cdot \text{F/O} + 423 \text{ PFR} \cdot \text{F/O} + 29,26 \text{ SOD} \cdot \text{PFR} \cdot \text{F/O} - 473,7 \text{ Ct Pt} \quad (3.6.3)$$



Corelația dintre coeficientul de absorbție K-M mediu în domeniul lungimilor de undă 200 – 800 nm și SOD, PFR și F/O este descrisă de ecuația 3.6.4:

$$K-M = 3,26 - 0,0103 \text{ SOD} + 0,8033 \text{ PFR} + 43,3 \text{ F/O} - 0,005453 \text{ SOD} \cdot \text{PFR} - 0,259 \text{ SOD} \cdot \text{F/O} - 7,833 \text{ PFR} \cdot \text{F/O} + 0,05648 \text{ SOD} \cdot \text{PFR} \cdot \text{F/O} - 0,767 \text{ Ct Pt} \quad (3.6.4)$$

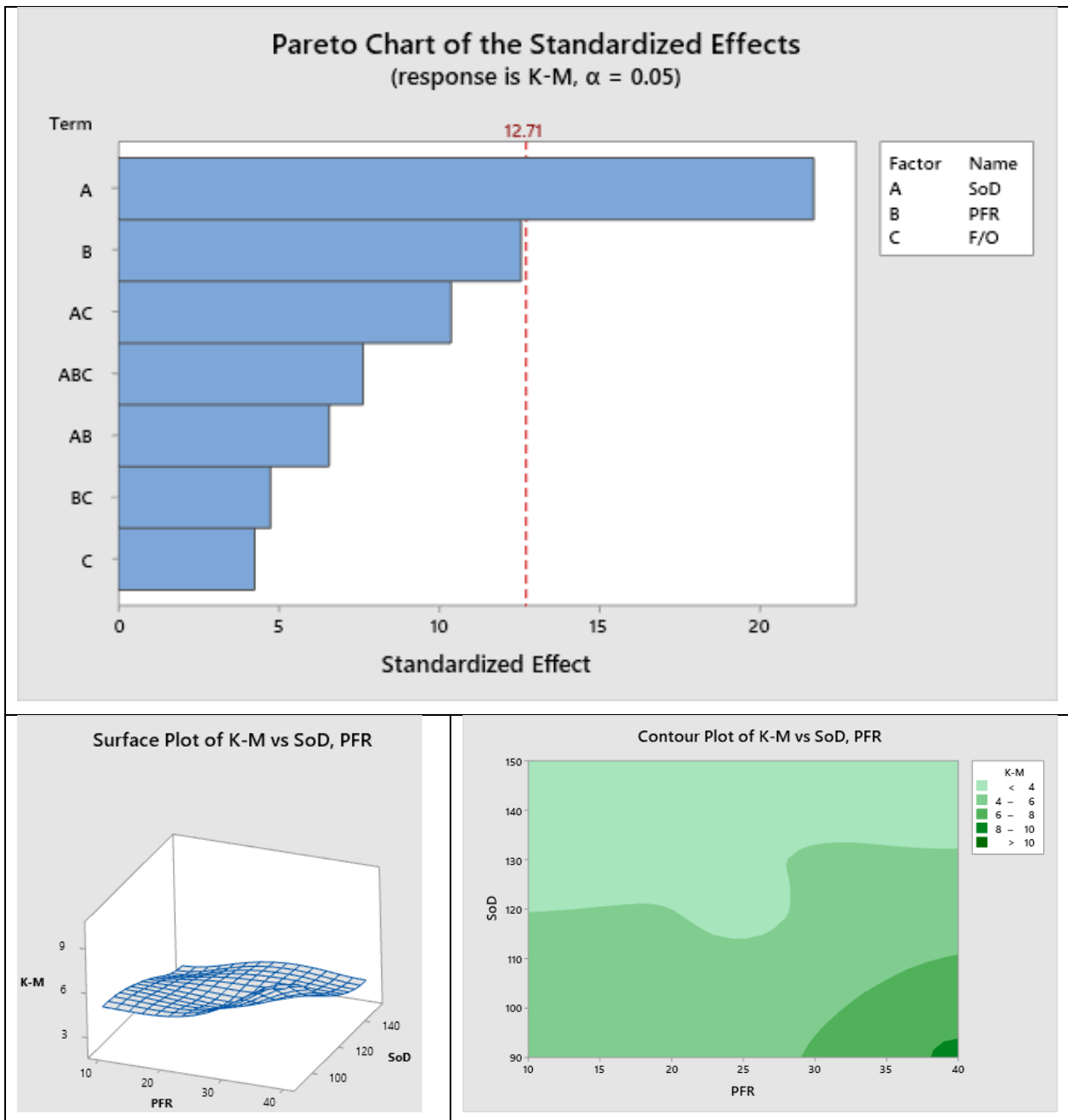


Figura 3.6.4: Diagrama Pareto și corelațiile între coeficientul de absorbție K-M mediu în domeniul spectral 200-800 nm și distanța de pulverizare (SOD), respectiv debitul de pulbere (PFR)

3.6.2 Tehnologie optimizată de realizare de straturi depuse din Al_2O_3 3TiO_2 prin procedeul de pulverizare termică HVOF

În urma analizei rezultatelor obținute, s-a concluzionat că tehnologia optimizată de depunere amestecuri de pulberi Al_2O_3 3TiO_2 utilizând procedeul de pulverizare termică HVOF, se prezintă în **tabelul 3.6.1**.

Tabelul 3.6.1: Parametrii tehnologici de depunere HVOF optimizați, determinați pe baza rezultatelor experimentale

| Distanța de pulverizare SOD [mm] | Debitul de pulbere PFR [g/min] | Raportul combustibil / oxigen F/O | Coefficientul de absorbanță K-M mediu în domeniul spectral 200-800 nm | Rezistența la adeziune Rad [N/mm ²] |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 90 | 40 | 0,05 | 10,333 | 38,04 |

CAPITOLUL 4: Diseminare rezultate. Transferul de cunoștințe și tehnologii

Capitolul 4 prezintă modul de diseminare a rezultatelor proiectului. Acestea au fost diseminate pe pagina web a proiectului, gazduită de site ISIM, au fost elaborate 4 lucrări științifice, a fost actualizată o cerere de brevet de invenție și au fost elaborate două materiale de informare sub formă de postere care au fost prezentate, discutate și apreciate ca fiind deosebite, în cadrul expoziției internaționale de inovare și transfer tehnologic InnoCENTA 2024.



CAPITOLUL 5: Concluzii

Capitolul 5 detaliază principalele concluzii desprinse în urma implementării proiectului până în această etapă, evidențiind elemente cheie ale acestuia din urmă. Utilizarea și dezvoltarea materialelor avansate este o componentă esențială pentru creșterea performanței și eficienței echipamentelor energetice. Inovațiile în acest domeniu pot aduce beneficii considerabile pentru industrie și societate, contribuind la progresul tehnologic și la soluționarea provocărilor legate de durabilitate și eficiență energetică.

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului (se vor preciza stadiul de implementare a proiectului, gradul de îndeplinire a obiectivului cu referire la țintele stabilite și indicatorii asociați pentru monitorizare și evaluare).

În vederea atingerii obiectivelor propuse, în cadrul fazei 4 a proiectului s-a conceput și implementat un program experimental adecvat privind fabricarea avansată a unor straturi depuse cu proprietăți absorbante și testarea acestora în condiții de laborator. Straturile depuse s-au realizat prin pulverizare termică, pe un suport din oțel termorezistent 10CrMo9.10, utilizând un amestec de pulberi Al_2O_3 3TiO₂. Alegerea acestor pulberi s-a realizat pe baza experimentelor preliminare care au confirmat capacitatea acestor pulberi de a fi utilizate în condiții excelente pentru producerea ceramicilor avansate și depunerea acestora sub formă de straturilor funcționale destinate protejării suprafețelor metalice, datorită proprietăților sale termice și mecanice. Programul experimental a vizat evaluarea caracteristicilor termice și mecanice a acestor straturi depuse și optimizarea parametrilor tehnologici de pulverizare termică HVOF.

În cadrul fazei au fost elaborate trei articole științifice care au fost prezentate în cadrul Conferinței Internaționale "Innovative Technologies for Joining Advanced Materials" TIMA24, care a avut loc în perioada 07-08 Noiembrie 2024 și care urmează să fie publicate în reviste indexate în baze de date internaționale. De asemenea, s-a elaborat o lucrare științifică destinată a fi publicată într-o revistă indexată ISI cu factor de impact. În cadrul fazei s-a realizat actualizarea cererii de brevet de invenție privind: „Sistem informatizat de încercare la oboseală termică a straturilor funcționale sau de protecție”, precum și modificarea în consecință a sistemului informatizat de încercare la oboseală termică din dotarea laboratorului LIEA al ISIM Timișoara.

În vederea creșterii vizibilității rezultatelor obținute s-a actualizat pagină web a proiectului, realizată în secțiunea „Cercetare – Program Nucleu”, a site-ului ISIM Timișoara (www.isim.ro). De asemenea rezultatele obținute au fost prezentate la târgul internațional InnoCENTA 2024 unde au primit aprecieri pozitive.

Această lucrare contribuie semnificativ la aprofundarea cunoștințelor în domeniul materialelor avansate și al tehnologiilor de pulverizare termică, oferind un cadru adecvat pentru optimizarea proceselor de producție și dezvoltarea de noi materiale cu performanțe îmbunătățite. Prin activitățile desfășurate, considerăm că obiectivele fazei 4 au fost atinse. Pentru a extinde cercetările, propunem continuarea proiectului cu faza 5/2025, cu denumirea: “Concepere program experimental și efectuarea de cercetări experimentale privind fabricația avansată a stratului antireflectorizant”.

Responsabil proiect,

Dr. ing. Alin Constantin MURARIU