

Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara (anexa la procesul verbal de avizare interna nr. 5/09.12.2025)
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: 7: Concepere program experimental complex privind optimizarea sistemului de acoperire componente intens solicitate termic și mecanic

Termen de încheiere a fazei: 15.06.2026

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:

Conceperea unui program experimental complex privind optimizarea sistemului de acoperire componente intens solicitate termic și mecanic

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

R1: 1 studiu/ raport

R3: 2 articole științifice

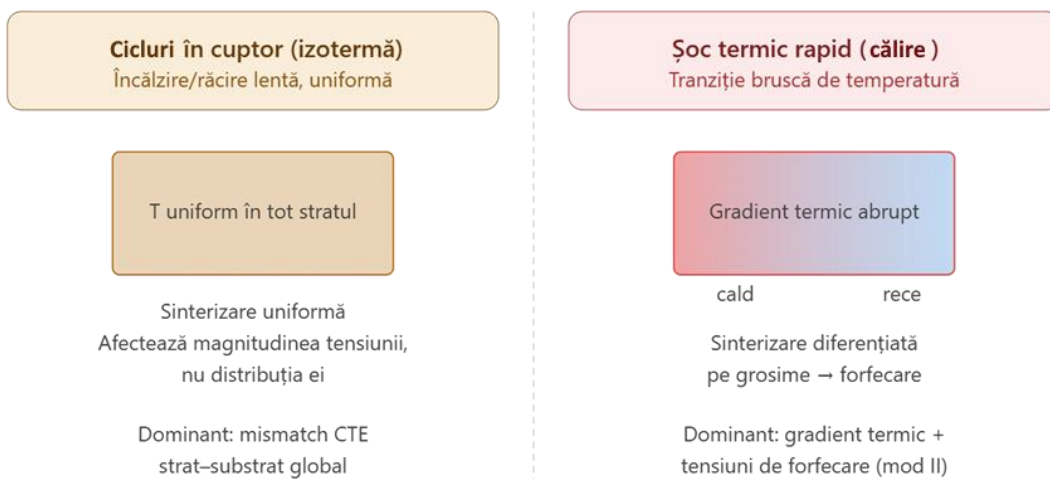
R10: 1 sistem de acoperire optimizat

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

CAPITOLUL 1: Introducere

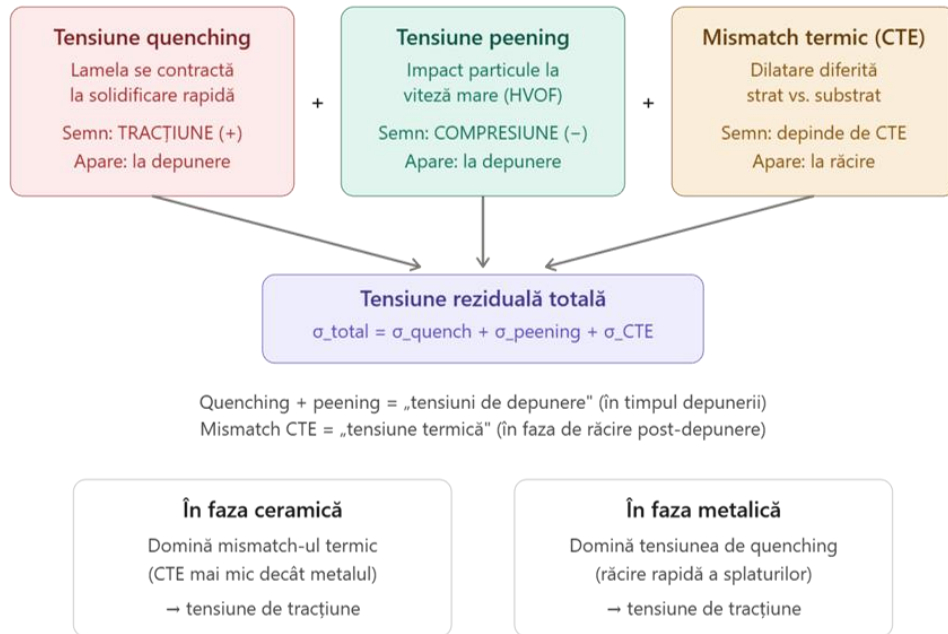
1.1 Contextul și importanța dezvoltării sistemelor avansate de acoperire

Capitolul 1 prezintă fundamentele teoretice ale procedurii HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) și particularitățile acestuia în raport cu pulverizarea cu plasmă (APS), subliniind influența vitezei și temperaturii particulelor asupra microstructurii straturilor $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (structură lamelară, porozitate redusă, particule netopite). Sunt analizate transformările de fază $\gamma \rightarrow \alpha$ ale aluminei și efectul conținutului de TiO_2 asupra retenției fazei α și asupra rezistenței la șoc termic.



Tipuri de cicluri la oboseală termică

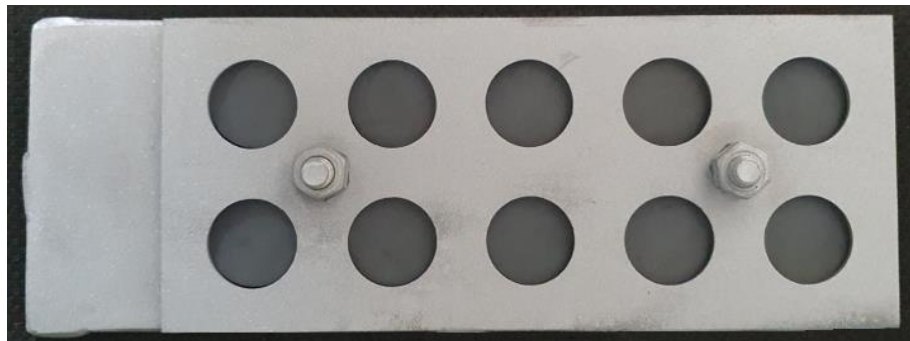
Capitolul detaliază sursele tensiunilor reziduale precum și mecanismele oboseii termice: inițierea fisurilor la concentratori de tensiune, propagarea inter- și intra-lamelară și delaminarea / exfolierea finală. În final, este argumentată importanța arhitecturilor multistrat și funcțional gradate (FGM), precum și rolul stratului intermediar (bond coat) în reducerea tensiunilor reziduale și creșterea durabilității la oboseală termică.



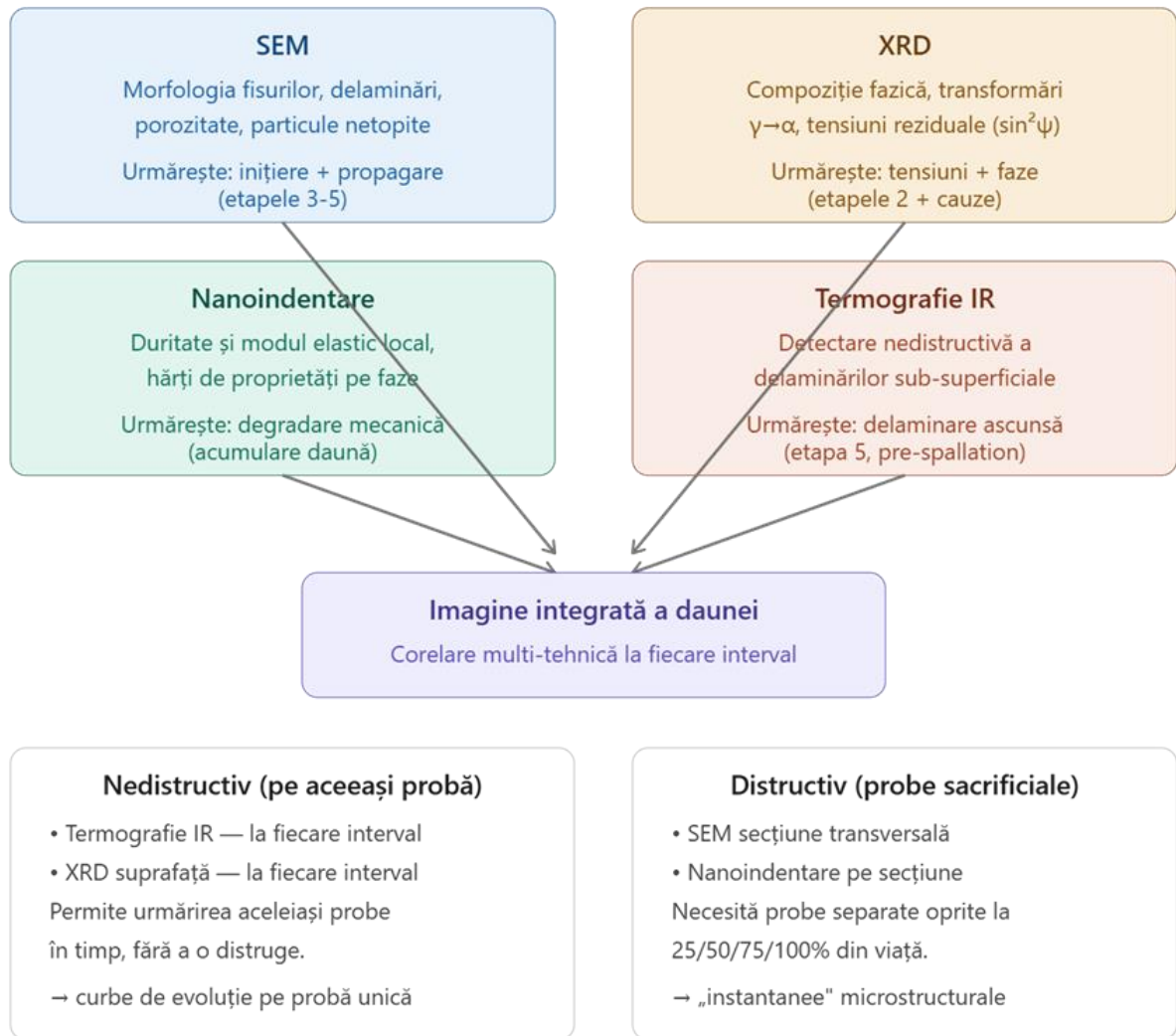
Surse de tensiuni reziduale la depunerea de straturi prin procedeul HVOF

CAPITOLUL 2: Proiectarea programului experimental pentru realizarea și testarea sistemului de acoperire

Capitolul 2 descrie programul experimental privind optimizarea sistemului de acoperire. Este prezentată metodologia încercărilor la oboseală termică, prin cicluri în cuptor și prin șoc termic, cu intervale de inspecție stabilite (1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 cicluri), precum și aparatura de monitorizare a degradării: microscopia electronică de scanare (SEM), difracția de raze X (XRD), nanoindentarea și termografia IR, alături de indicatorii cantitativi ai degradării (modulul de elasticitate, semnătura termică).



Probe destinate încercării la oboseală termică (în cuptor și prin șoc termic)



Structura programului experimental

Sunt detaliate elementele componente ale sistemului de acoperire: substratul din oțel termorezistent 10CrMo9.10 și stratul funcțional $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$ (Metco 6257), cu proprietățile mecanice, tribologice, termice și fizico-chimice așteptate, precum și etapele de pregătire a suprafeței și parametrii experimentului factorial HVOF (distanța de pulverizare SOD, debitul de pulbere PFR, raportul combustibil/oxigen F/O).

Capitolul include și o analiză teoretică amplă a comportării termice a probelor (validarea modelului corpului cu rezistență termică neglijabilă prin numărul Biot, calculul tensiunilor termice prin formula Stoney, distanța de segmentare, modelul de degradare a interfeței și estimarea numărului de cicluri până la cedare prin modelul Paris), formulând recomandări pentru creșterea duratei de viață la oboseală termică.

CAPITOLUL 3: Realizarea epruvetelor pentru încercarea la oboseală termică

Capitolul 3 prezintă rezultatele experimentale obținute pe straturile de $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$ depuse prin HVOF cu parametrii tehnologici optimizați. Pe baza analizei statistice a rezultatelor experimentale au fost stabilite corelații între parametrii procesului HVOF (SOD,

PFR, F/O) și forța de zgâriere F, respectiv reflectanța în domeniul ultraviolet RUV, fiind identificați parametrii tehnologici optimi: SOD 150 mm, PFR 40 g/min și F/O 0,10.

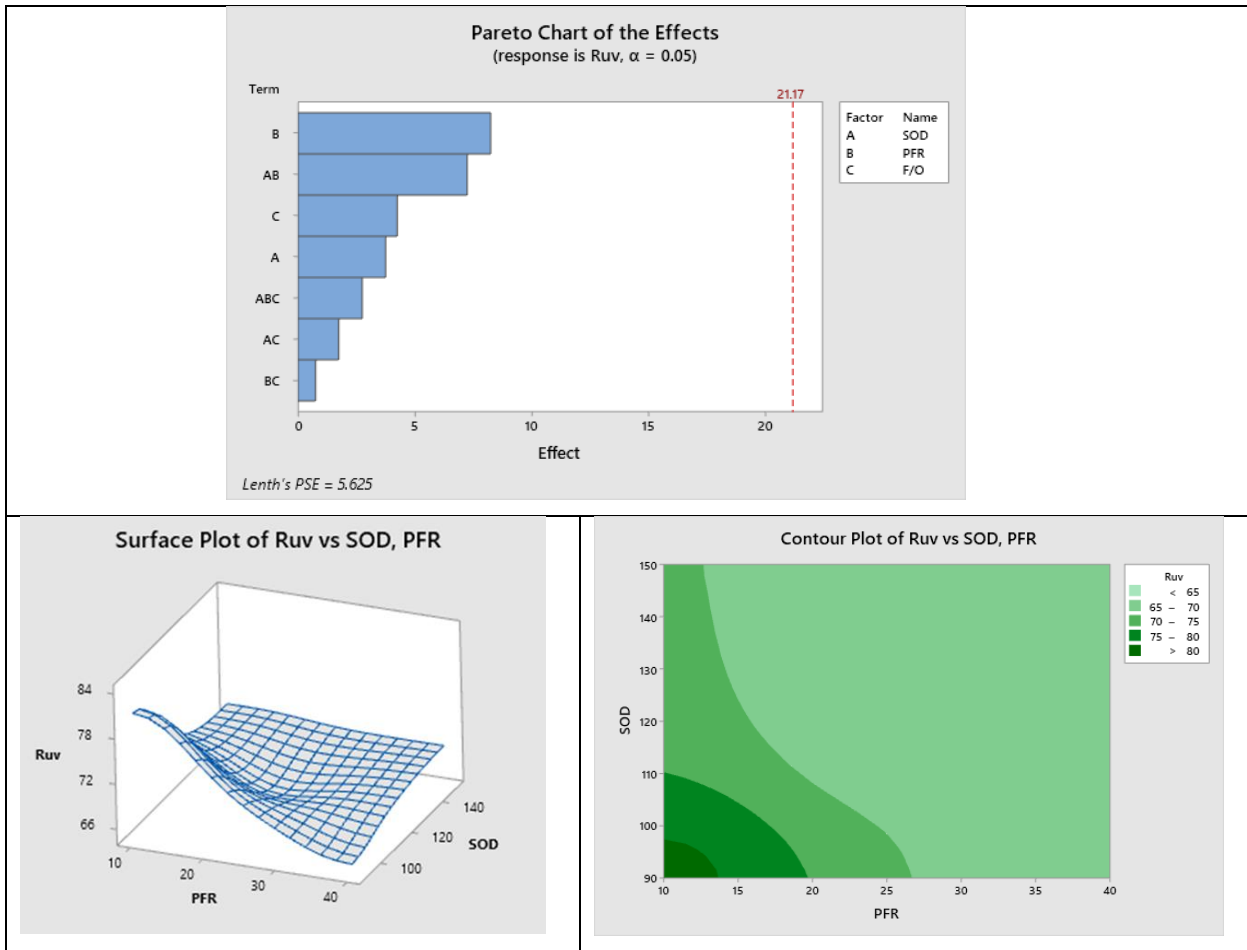
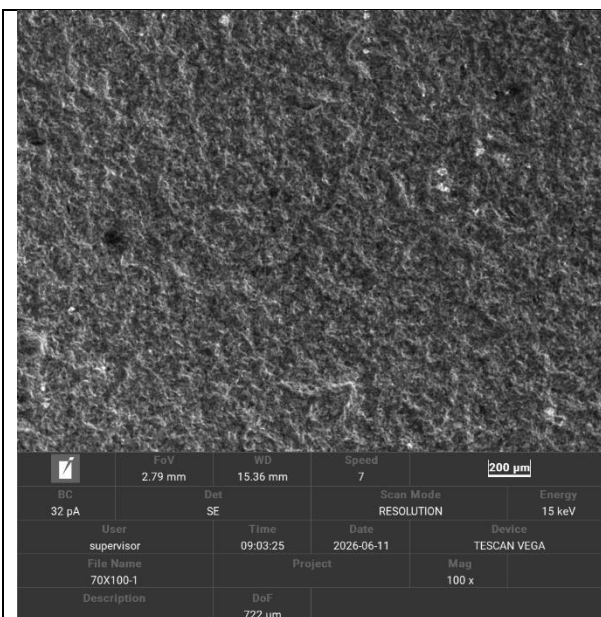
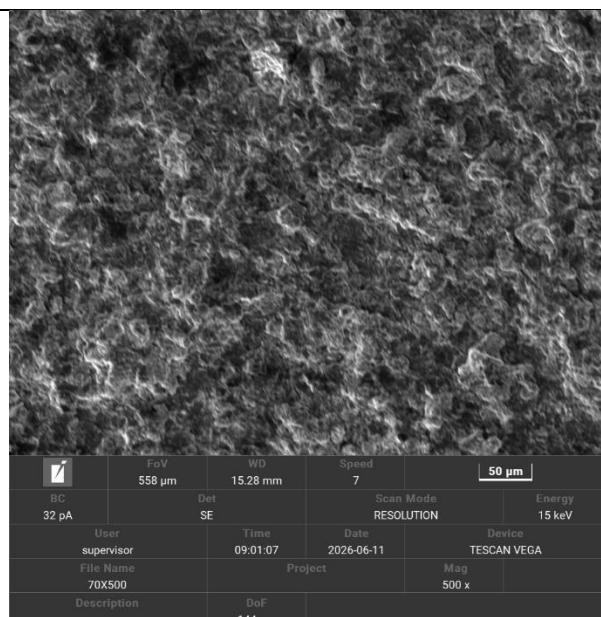


Diagrama Pareto și corelațiile între reflectanța în domeniul ultraviolet și principalii parametri tehnologici ai procedului HVOF

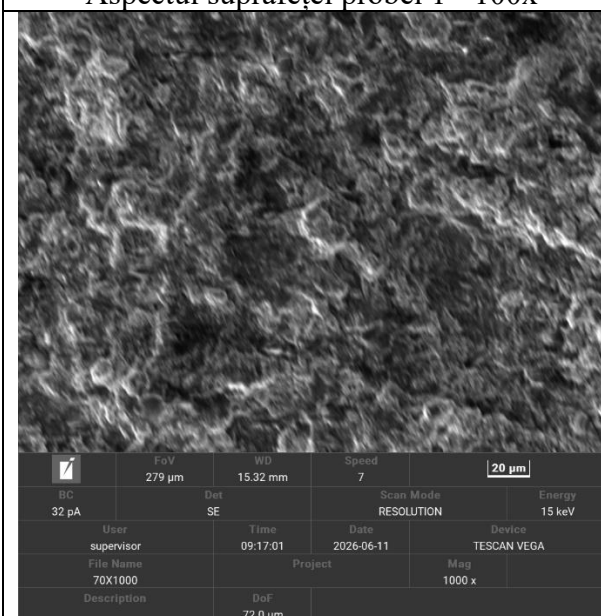
Încercările la zgâriere, realizate pe platforma Step 500 cu modulul MCT3 (penetrator Rockwell cu vârf de diamant), au permis evaluarea aderenței și rezistenței la zgâriere a stratului depus. Analiza microstructurală prin microscopie electronică de scanare (SEM Tescan VEGA LMU), însoțită de analiza chimică locală EDX, a fost realizată pe probe nesupuse și pe probe supuse unui număr crescător de cicluri de solicitare termică (700→25°C, cu răcire prin jet de aer comprimat și, respectiv, prin răcire în apă), urmărind evoluția morfologiei suprafeței odată cu creșterea numărului de cicluri termice.



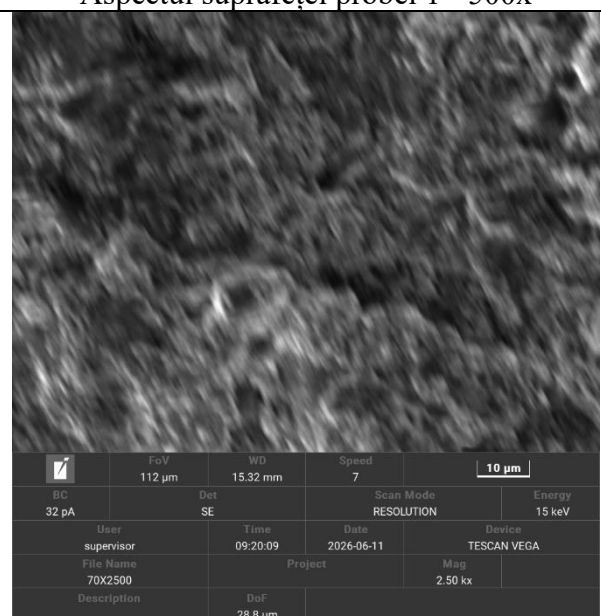
Aspectul suprafeței probei 1 - 100x



Aspectul suprafeței probei 1 - 500x



Aspectul suprafeței probei 1 - 1000x

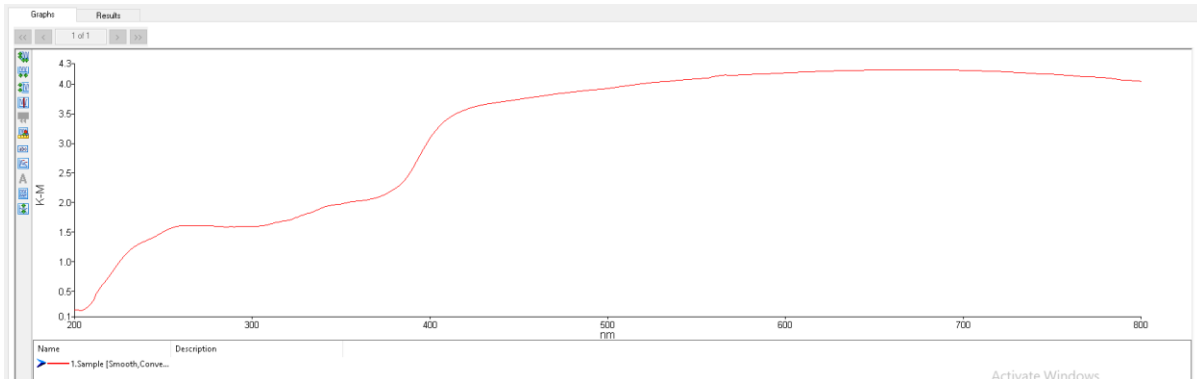


Aspectul suprafeței probei 1 - 2500x

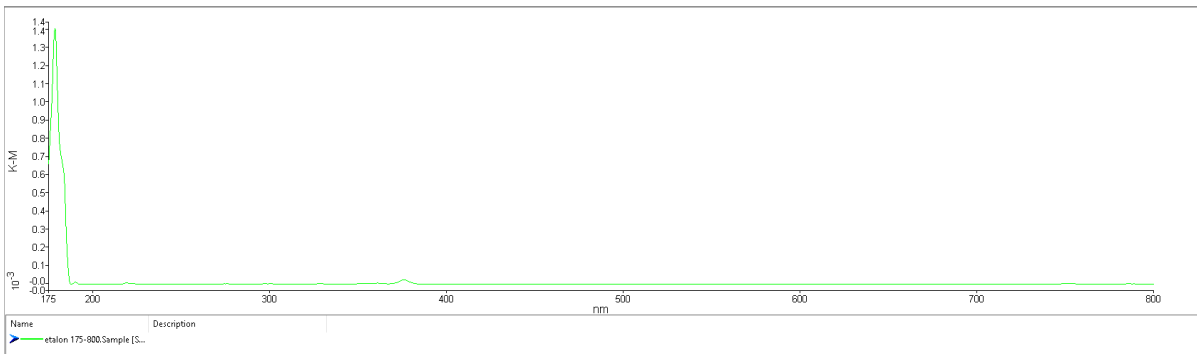
Aspectul suprafeței stratului de Al_2O_3 40 TiO_2 depus cu procedeul HVOF - proba 70 (după 70 cicluri de solicitare termică $700 \rightarrow 25^\circ\text{C}$, răcire cu jet de aer comprimat)

Capitolul include de asemenea analiza spectroscopică UV-Vis (spectrometru Lambda 950), prin care au fost determinate reflectogramele și spectrele de absorbție ale stratului depus, comparativ cu cele ale substratului din oțel termorezistent 10CrMo9.10.

În figurile de mai jos se prezintă spectrele de absorbție (absorbția în funcție de lungimea de undă) pentru proba cu straturi depuse Al_2O_3 40 TiO_2 , cu parametrii optimi, realizată în cadrul programului experimental, precum și spectrul de absorbție a oțelului termorezistent 10CrMo9.10.



Spectrul de absorbție strat depus Al_2O_3 40 TiO_2 - parametrii optimi de proces



Spectrul de absorbție al substratului - oțel termorezistent 10CrMo9.10

CAPITOLUL 4: Diseminare rezultate

Capitolul 4 este dedicat diseminării rezultatelor obținute în faza 7. Sunt consemnate actualizarea paginii web a proiectului, în secțiunea „Proiecte” a ISIM Timișoara, elaborarea a două articole științifice acceptate spre publicare în revista *Welding and Material Testing - BID ISIM*, respectiv pentru prezentare la cea de-a 24-a ediție a *International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2026, Constanța, 1–4 iulie 2026)*, precum și participarea echipei de proiect la cea de-a 7-a ediție a *Expoziției Internaționale INVENTCOR (2–4 aprilie 2026, Deva)*, unde rezultatele proiectului au fost prezentate în cadrul simpozionului „The Power of Creative Mind” și au fost recompensate cu un certificat de excelență.



Poster & certificat de excelență

CAPITOLUL 5: Concluzii

Rezultatele prezentate confirmă soluția de optimizare a sistemului de acoperire HVOF pe bază de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\%\text{TiO}_2$ pentru oțeluri termorezistente de tip 10CrMo9.10, evidențiind, pentru parametri tehnologici optimizați (SOD 150 mm, PFR 40 g/min, F/O 0,10), straturi cu duritate ridicată, aderență și rezistență la zgâriere corespunzătoare, precum și proprietăți optice (reflectanță și absorbție) bine definite. Investigațiile microstructurale și spectroscopice efectuate pe probe supuse unui număr crescător de cicluri de solicitare termică oferă o bază solidă pentru evaluarea evoluției degradării straturilor în timp și pentru fundamentarea modelelor teoretice de durată de viață la oboseală termică.

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).

Faza 7 a proiectului PN 23 37 01 01, „Sistem de acoperire nanocompozit pentru energie regenerabilă”, a înregistrat rezultate notabile prin conceperea și aplicarea unui program experimental complex privind optimizarea sistemului de acoperire ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\%\text{TiO}_2$, depus prin pulverizare termică HVOF, destinat protecției componentelor din oțel termorezistent 10CrMo9.10 supuse, în exploatare, la temperaturi ridicate, cicluri termice repetate și solicitări mecanice combinate. Fundamentele teoretice elaborate au stabilit că performanța la oboseală termică a acestor straturi este guvernată de microstructura lamelară și porozitatea stratului, gradul de retenție a fazei $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, nivelul și natura tensiunilor reziduale, precum și de mecanismele de inițiere și propagare a fisurilor inter- și intra-lamelare, care conduc la delaminare și exfoliere. Pe baza acestor fundamente

a fost proiectat un program experimental riguros de încercare la oboseală termică (cicluri în cuptor și prin șoc termic, cu intervale de inspecție etapizate) și a fost stabilit un experiment factorial pentru identificarea parametrilor tehnologici HVOF optimi (distanța de pulverizare SOD, debitul de pulbere PFR și raportul combustibil/oxigen F/O).

Pe baza analizei statistice a rezultatelor experimentale obținute pe probele acoperite cu amestecul de pulberi $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\%\text{TiO}_2$ au fost stabilite corelațiile dintre parametrii procesului HVOF (SOD, PFR, F/O) și funcțiile obiectiv principale (forța de zgâriere F și reflectanța în domeniul ultraviolet R_{UV}), fiind identificați parametrii tehnologici optimi. Pentru această combinație de parametri au fost obținute simultan o reflectanță ridicată în domeniul ultraviolet și o rezistență superioară la zgâriere. Analiza microstructurală prin microscopie electronică de scanare, însoțită de analiza chimică locală EDX, a fost realizată pe probe nesupuse și pe probe supuse unui număr crescător de cicluri de solicitare termică ($700\rightarrow 25^\circ\text{C}$, cu răcire prin jet de aer comprimat și prin răcire în apă), iar analiza spectroscopică UV-Vis a permis caracterizarea reflectogramelor și a spectrelor de absorbție ale stratului depus, comparativ cu cele ale substratului.

Stadiul de implementare a proiectului este conform graficului de realizare asumat prin contractul de finanțare nr. 16N/2023, faza 7 fiind finalizată la termen, fără abateri de la planul tehnic și financiar. Obiectivul fazei, respectiv conceperea și aplicarea unui program experimental complex privind optimizarea sistemului de acoperire pentru componente intens solicitate termic și mecanic, a fost îndeplinit integral. În raport cu rezultatele preconizate pentru atingerea obiectivului fazei, gradul de realizare se prezintă astfel: indicatorul R1 (1 studiu/raport) este îndeplinit prin elaborarea prezentului raport de activitate, care documentează fundamentele teoretice, programul experimental și rezultatele obținute; indicatorul R3 (2 articole științifice) este îndeplinit prin cele două lucrări acceptate spre publicare în revista Welding and Material Testing – BID ISIM și pentru prezentare la IBWAP 2026; indicatorul R10 (1 sistem de acoperire optimizat) este îndeplinit prin identificarea și validarea în laborator a parametrilor tehnologici optimi pentru sistemul de acoperire $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\%\text{TiO}_2$, caracterizat prin duritate, aderență/rezistență la zgâriere și proprietăți optice corespunzătoare cerințelor.

Diseminarea rezultatelor obținute în faza 7 a contribuit la creșterea vizibilității proiectului în mediul științific și industrial, prin actualizarea paginii web a proiectului în secțiunea „Proiecte” a ISIM Timișoara, prin elaborarea celor două articole științifice menționate, precum și prin participarea echipei de proiect la cea de-a 7-a ediție a Expoziției Internaționale INVENTCOR (2–4 aprilie 2026, Deva), unde rezultatele au fost prezentate în cadrul simpozionului „The Power of Creative Mind” și au fost recompensate cu un certificat de excelență. Toate acestea reflectă un grad ridicat de îndeplinire a obiectivelor asumate pentru această etapă și un impact semnificativ asupra mediului științific și industrial, fundamentele teoretice și rezultatele experimentale obținute oferind o bază solidă pentru etapele viitoare de validare a duratei de viață la oboseală termică a sistemului de acoperire optimizat.

Cercetarea contribuie la dezvoltarea soluțiilor de protecție pentru componente utilizate în industrii critice, precum energetică, aeronautică, subliniind importanța proceselor robotizate și a controlului strict al parametrilor tehnologici.

Continuarea proiectului va contribui la dezvoltarea de soluții avansate pentru protecția componentelor utilizate în industrii critice, consolidând competitivitatea și relevanța acestora în context global. Pentru continuarea acestor realizări, se propune continuarea cercetărilor în cadrul proiectului *PN 23 37 01 01* cu denumirea: *"Sistem de acoperire nanocompozit pentru energie regenerabilă"*, acronim *Nano Energ*, cu faza 8 cu denumirea: *"Validarea tehnologiei pentru sistemul de acoperire destinat protejării componentelor exploatare în condiții severe de temperatură și tensiune"*.

Responsabil proiect,

Dr. ing. Alin Constantin MURARIU