

Contractor: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara (anexa la procesul verbal de avizare internă 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: 6: Concepere program experimental complex privind fabricația avansată a sistemului de acoperire componente intens solicitate termic și mecanic

Termen de încheiere a fazei: 09.12.2025

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 exploatate 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 fabricația avansată a sistemului de acoperire componente intens solicitate termic și mecanic

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

R1: 1 studiu/ raport

R3: 3 articole științifice publicate

R6: 3 participări la conferințe internaționale

R7: 1 participare la târg internațional

R8: cerere brevet de invenție

5. Rezumatul fazei: (*maxim 5 pagini*)

CAPITOLUL 1: Introducere

1.1 Contextul și importanța dezvoltării sistemelor avansate de acoperire

Acoperirile avansate au devenit elemente cheie în industrii de vârf, oferind soluții pentru condiții extreme de funcționare. Acestea nu mai au doar un rol protector, ci îndeplinesc funcții complexe precum barieră termică, strat antifricțiune, anticoroziv sau izolație electrică și termică. În aeronautică și energie, acoperirile contribuie la creșterea eficienței și reducerea emisiilor, protejând componentele supuse la temperaturi extreme și medii reactive. În automotive, ele reduc frecarea și uzura, optimizează performanțele vehiculelor electrice și îmbunătățesc managementul termic. În fabricația industrială și aplicațiile emergente, acoperirile extind durata de viață a componentelor, asigură rezistență chimică și mecanică, și facilitează tehnologii precum hidrogenul verde sau pilele de combustie.

Acoperirile permit separarea funcțiilor între materialul de bază și stratul aplicat, crescând astfel performanța fără a afecta integritatea structurală. Ele adaugă, de asemenea, avantaje economice prin reducerea costurilor, extinderea duratei de viață a componentelor și contribuția la economia circulară și decarbonizare.

1.2 Direcții strategice pentru programe experimentale avansate

Dezvoltarea sistemelor avansate de acoperire este direcționată către inovație interdisciplinară și integrarea progreselor tehnologice. Direcțiile strategice includ:

- **Design integrat material-proces-componentă**, utilizând gemeni digitali și optimizare inversă pentru corelarea proprietăților stratului cu parametrii de depunere.
- **Tehnologii hibride de depunere**, care combină metode precum APS/SPS cu PVD/ALD, pentru a crea arhitecturi avansate de straturi funcționale.
- **Metodologii de testare accelerată**, pentru validarea performanței în medii extreme.
- **Reparații și recondiționare**, prin tehnologii precum Cold Spray și depuneri atomice ALD, care extind ciclul de viață al componentelor.
- **Integrarea cu fabricația aditivă**, pentru aplicarea de acoperiri pe structuri complexe și optimizarea proprietăților materialelor.
- **Digitalizarea proceselor**, prin senzori și monitorizare în timp real, pentru a crește fiabilitatea și eficiența.

Aceste direcții sunt esențiale pentru a răspunde provocărilor legate de medii agresive, controlul tensiunilor reziduale, sustenabilitate și scalarea proceselor. Prin aceste strategii, acoperirile avansate devin un factor determinant pentru competitivitate, siguranță operațională și tranziția către tehnologii mai durabile.

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

2.1 Conceptul sistemului de acoperire pentru componente intens solicitate termic și mecanic

Programul experimental propune realizarea unui sistem de acoperire performant pentru componente din oțel termorezistent 10CrMo9-10, utilizat în condiții de temperaturi ridicate, cicluri termice repetate și solicitări mecanice severe. Acoperirea este aplicată prin pulverizare termică HVOF și constă în două straturi funcționale ceramice: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\% \text{TiO}_2$ pentru duritate ridicată și $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$ pentru tenacitate și rezistență la șoc termic. Sistemul rezultă dintr-o echilibrare atentă între densitate, aderență și porozitate controlată, adaptată aplicațiilor critice.

Pregătirea substratului presupune degresare, sablare și curățare pentru a asigura ancorarea mecanică a stratului ceramic. Depunerea utilizează parametri HVOF optimizați, cu preîncălzire moderată a substratului și relaxare termică post-depunere pentru reducerea tensiunilor reziduale. Beneficiile includ protecție termică și anticorozivă, rezistență la uzură/eroziune și stabilitate excelentă în cicluri termice. Metodologia de evaluare implică teste de aderență, măsurători de porozitate și grosime, precum și încercări la oboseală termică, cu criterii stricte de acceptanță.

2.2 Cerințe funcționale și tehnice

Cerințele sistemului de acoperire sunt definite pentru a asigura performanța în exploatare și reproductibilitatea procesului.

Funcțional, acoperirile trebuie să reziste la 1.000 de cicluri termice (200–600°C) fără fisuri sau exfolieri și să atingă o aderență de minimum 50 MPa. Tehnic, substratul trebuie

pregătit conform standardelor internaționale, iar pulberile ceramice utilizate trebuie să respecte specificații granulometrice stricte. Tehnologia HVOF impune parametri bine controlați, precum distanța de pulverizare și raportul combustibil-oxigen, pentru a obține densitate ridicată și porozitate scăzută. După depunere, straturile pot fi finisate mecanic și testate pentru a verifica grosimea, rugozitatea și comportamentul la oboseală termică.

Pentru reducerea riscurilor, se aplică proceduri stricte de pregătire a substratului, calibrare a echipamentelor și monitorizare a procesului. Conformitatea este verificată prin încercări standardizate și trasabilitate completă a datelor.

2.3 Arhitectura programului experimental

Arhitectura programului experimental asigură obținerea unor acoperiri HVOF de înaltă performanță, aplicabile pe componente critice. Programul este structurat în trei etape: pregătirea materialelor și a echipamentelor, depunerea stratului funcțional și testarea/optimizarea parametrilor.

În prima etapă, substratul este selectat, pregătit prin sablare și curățare, iar pulberile ceramice sunt caracterizate pentru a verifica puritatea și granulometria. În etapa de depunere, parametrii HVOF sunt reglați pentru a produce straturi dense, cu rugozitate și grosime controlate. Monitorizarea procesului este continuă, iar probe martor sunt utilizate pentru validarea în timp real.

Ultima etapă include testarea straturilor la oboseală termică (200–600°C), analiza microstructurală și optimizarea parametrilor prin metode statistice, precum Design of Experiments. Integrarea echipamentelor HVOF cu roboți de manipulare și sisteme de măsurare precise asigură trasabilitate și repetabilitate.

Programul experimental creează un cadru complet pentru dezvoltarea și validarea unor acoperiri performante, cu aplicații în industrii exigente precum energetică și aeronautică.

CAPITOLUL 3: Realizarea epruvetelor pentru încercarea la oboseală termică

3.1 Prelevarea și pregătirea epruvetelor extrase din materialul de bază

Materialul de bază utilizat a fost oțelul termorezistent 10CrMo9-10, extras dintr-o conductă DN 450 aflată în exploatare industrială, pentru a asigura relevanța față de condițiile reale de utilizare. Secționarea conductei s-a realizat mecanic, evitând introducerea de tensiuni suplimentare. Ulterior, segmentele au fost prelucrate mecanic pentru a obține epruvete cilindrice standardizate, cu dimensiuni precise (diametru 10 mm, lungime 90 mm), capete filetate pentru fixare și toleranțe stricte. Fiecare epruvetă a fost supusă unui control dimensional riguros pentru a verifica concentricitatea, absența defectelor macroscopice și conformitatea cu cerințele experimentale.

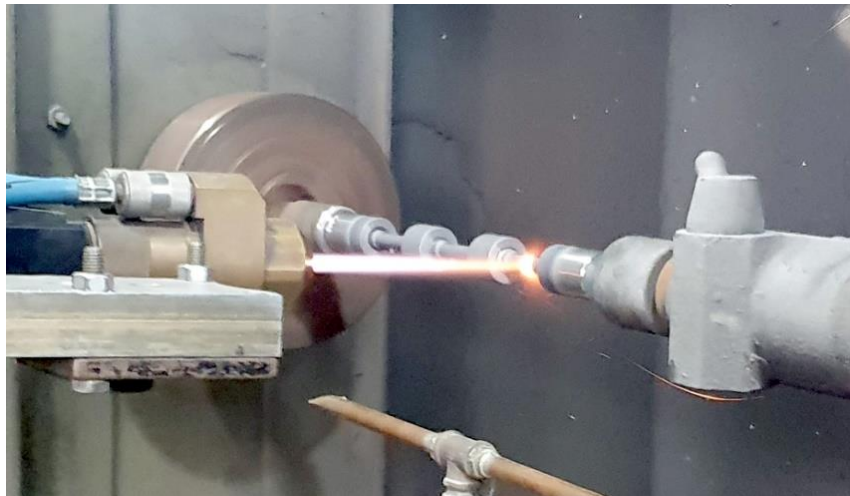
3.2 Etapa de sablare și curățire / degresare

Pentru a asigura o aderență optimă între substratul metalic și stratul ceramic protector, suprafața epruvetelor a fost pregătită printr-un proces riguros de sablare și curățire. Degresarea inițială s-a realizat cu alcool izopropilic, iar sablarea a fost efectuată cu

corindon F24–F36 la o presiune de 0,5–0,7 MPa, obținându-se o rugozitate Ra 4–6 μm , considerată optimă pentru ancorarea mecanică a stratului ceramic. După sablare, suprafețele au fost curățate cu aer uscat și alcool izopropilic, fiind manipulate exclusiv cu mânuși pentru a preveni contaminarea. Intervalul între sablare și depunerea stratului ceramic a fost limitat la 4 ore pentru a evita oxidarea superficială.

3.3 Etapa de pulverizare termică prin metoda HVOF robotizată

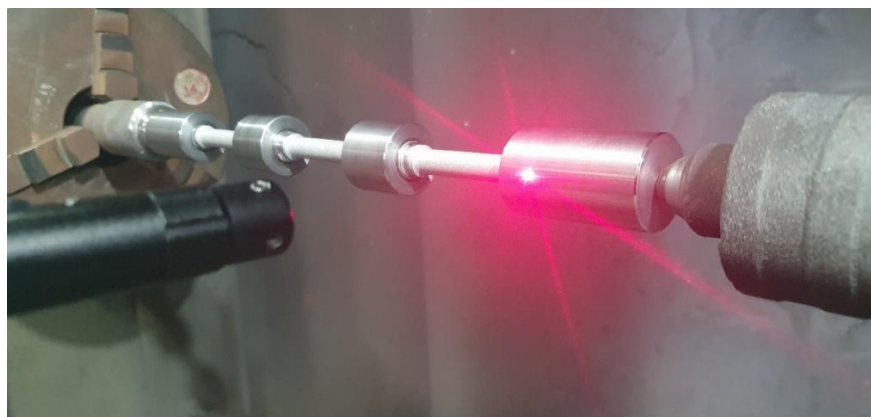
Depunerea straturilor ceramice s-a realizat utilizând tehnologia HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), cu ajutorul unui pistol DJ2700 și a unui robot industrial KUKA, pentru a asigura uniformitatea și repetabilitatea procesului. Stratul 1, compus din $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$, și stratul 2, compus din $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\% \text{TiO}_2$, au fost aplicate în câte 4 treceri succesive.



Parametrii de proces, precum viteza de deplasare a pistolului (60 mm/s), rotația epruvetei (600 rot/min) și răcirea continuă cu aer rece, au fost strict monitorizați pentru a preveni supraîncălzirea și pentru a obține o grosime uniformă a stratului.



Procesul a inclus verificări constante ale parametrilor de pulverizare (debit de pulbere, raport combustibil-oxigen, distanța dintre pistol și epruvetă – SOD) și depunerea de probe martor, utilizate pentru verificări rapide de grosime, rugozitate și aderență.



CAPITOLUL 4: Diseminare rezultate

4.1 Actualizare pagină web proiect

Pagina dedicată proiectului de pe site-ul ISIM Timișoara a fost actualizată pentru a reflecta progresul realizat, asigurând transparența și diseminarea eficientă a informațiilor către mediul științific și industrial. Aceasta oferă detalii despre rezultatele obținute în etapa de concepere a programului experimental și contribuie la creșterea vizibilității proiectului.

4.2 Elaborare, prezentare / publicare articole științifice

Activitățile de diseminare au inclus publicarea a trei articole științifice în revista *Solid State Phenomena*, prezentarea a două lucrări la conferințe internaționale (10th Central-European Symposium on Plasma Chemistry și 16th International Conference on Innovative Technologies for Joining Advanced Materials – TIMA25) și acceptarea unei lucrări pentru prezentare la 16th International Exergy, Energy and Environment Symposium – IEEEES-2025.



Aceste contribuții au evidențiat rezultatele cercetării și au consolidat impactul proiectului în comunitatea științifică.

4.3 Cerere brevet de invenție

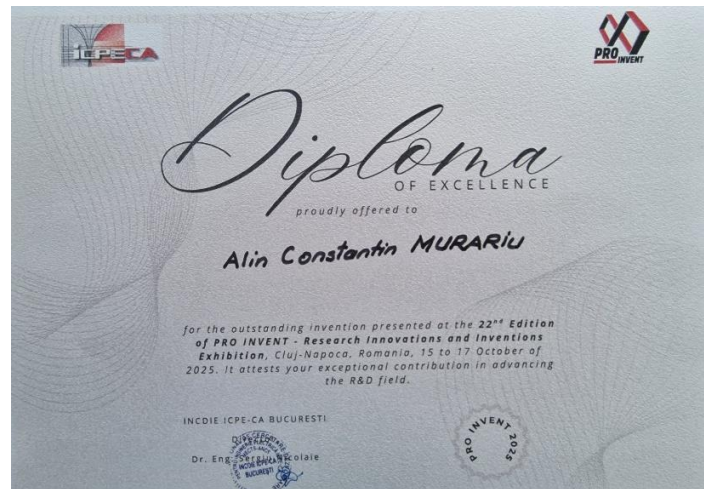
A fost elaborată documentația tehnică pentru cererea de brevet „Metodă și sistem integrat de monitorizare și testare accelerată la oboseală termică a acoperirilor funcționale și de protecție destinate utilizării la temperaturi ridicate”. Acest sistem inovator permite

testarea accelerată a acoperirilor în condiții similare celor din exploatarea industrială, având aplicații în industrii precum cea energetică, aerospațială, auto și chimică. Invenția asigură trasabilitate, repetabilitate și criterii obiective pentru evaluarea durabilității materialelor în medii extreme.

4.4 Participare la târguri și expoziții

Pentru a spori vizibilitatea proiectului, echipa ISIM Timișoara a participat la evenimente de prestigiu:

- **Salonul Internațional PRO INVENT 2025**, unde s-a prezentat cererea de brevet „Sistem de depunere dublu strat antireflex hidrofob-antistatic pentru optimizarea eficienței energetice”, primind aprecieri din partea organizatorilor.



- **Târgul Angajatori de TOP Timișoara**, care a facilitat stabilirea de colaborări între mediul academic, industrial și de cercetare, în conformitate cu conceptul european Quadruple Helix.



- **Festivalul Internațional de Inovare și Transfer Tehnologic – innoCENTA 2025**, care a susținut dialogul cu specialiști din domeniu și a favorizat transferul tehnologic al rezultatelor obținute.



Prin aceste activități, proiectul și-a consolidat vizibilitatea și a generat oportunități de colaborare și inovare, contribuind semnificativ la integrarea rezultatelor în rețelele globale de excelență.

CAPITOLUL 5: Concluzii

Capitolul final al lucrării sintetizează principalele realizări și concluzii rezultate din procesul complex de realizare și testare a epruvetelor destinate evaluării durabilității acoperirilor funcționale în medii cu solicitări termomecanice extreme. Alegerea oțelului termorezistent 10CrMo9-10, prelevat din conducte utilizate industrial, a asigurat relevanța probelor, iar prelucrările mecanice și verificările dimensionale riguroase au garantat conformitatea acestora cu cerințele experimentale.

Etapele de pregătire a suprafeței, prin degresare, sablare și curățare, au fost esențiale pentru obținerea unei aderențe ridicate între substrat și stratul ceramic. Sablarea cu corindon a oferit condiții ideale pentru ancorarea mecanică, iar manipularea atentă a prevenit contaminarea.

Depunerea stratului ceramic prin metoda HVOF, utilizând un robot industrial și un pistol DJ2700, a asigurat realizarea unor straturi uniforme, bine controlate, cu grosimi și rugozități optimizate. Stratul de $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$ a fost proiectat pentru toleranță la șocuri termice, iar cel de $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\% \text{TiO}_2$ pentru duritate și rezistență la uzură. Monitorizarea continuă a parametrilor procesului, precum debitul de pulbere și raportul combustibil/oxigen, a fost crucială pentru reproductibilitatea și trasabilitatea rezultatelor.

Lucrarea demonstrează importanța integrării unui flux tehnologic bine structurat pentru obținerea unor epruvete de înaltă calitate, adecvate testării în medii industriale extreme. Probele realizate constituie o bază solidă pentru încercările la oboseală termică și pentru optimizarea ulterioară a sistemelor de acoperire.

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).

Proiectul a înregistrat rezultate notabile în cadrul fazei 6, prin dezvoltarea unui sistem de acoperire funcțională și de protecție destinat componentelor supuse solicitărilor termomecanice extreme. Procesul a implicat realizarea unor epruvete standardizate din oțel termorezistent 10CrMo9-10, prelevat din conducte utilizate industrial, pentru a asigura relevanța și comparabilitatea acestora. Prelucrările mecanice detaliate și verificările dimensionale riguroase au contribuit la obținerea unor probe conforme cerințelor experimentale. Pregătirea suprafeței, prin degresare, sablare și curățare, a garantat o aderență optimă a stratului ceramic la substrat, evitând contaminarea și asigurând condiții ideale pentru ancorarea mecanică.

Depunerea straturilor ceramice prin metoda HVOF, utilizând un pistol DJ2700 și un robot industrial, a permis realizarea unor straturi uniforme, bine controlate, cu grosimi și rugozități optimizate. Stratul de $\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{TiO}_2$ oferă toleranță ridicată la șocuri termice, în timp ce stratul de $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\% \text{TiO}_2$ asigură duritate ridicată și rezistență superioară la uzură și abraziune. Monitorizarea continuă a parametrilor tehnologici, precum debitul de pulbere, raportul combustibil/oxigen și distanța de pulverizare, a fost esențială pentru obținerea unor rezultate reproductibile și trasabile. Verificările intermediare și utilizarea probelor martor au asigurat controlul grosimii stratului, al rugozității și al aderenței, contribuind decisiv la conformitatea probelor cu cerințele experimentale.

Stadiul realizării obiectivului fazei confirmă atingerea completă a țintelor stabilite. Obiectivul principal, conceperea unui program experimental pentru realizarea și testarea epruvetelor, a fost îndeplinit integral. Indicatorii tehnici, precum realizarea unor epruvete cu caracteristici dimensionale precise și straturi ceramice uniforme, au fost respectați. De asemenea, diseminarea rezultatelor s-a concretizat prin publicarea de articole științifice, participarea la conferințe internaționale și depunerea unei cereri de brevet. Toate acestea reflectă un grad ridicat de îndeplinire a obiectivelor și un impact semnificativ asupra mediului științific și industrial.

Lucrarea subliniază importanța unui flux bine structurat, de la prelevarea materialului de bază până la depunerea straturilor ceramice, pentru obținerea unor epruvete cu acoperiri de protecție de înaltă calitate. Probele rezultate oferă o bază solidă pentru testarea durabilității sistemelor de acoperire. Impactul tehnologic și științific al proiectului este susținut de vizibilitatea creată prin articole, participări la târguri și expoziții, precum și prin cererea de brevetare a unei soluții inovatoare de testare accelerată la oboseală termică.

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 7 cu denumirea: *"Concepere program experimental complex privind optimizarea sistemului de acoperire componente intens solicitate termic și mecanic"*.

Responsabil proiect,

Dr. ing. Alin Constantin MURARIU