

Raport activitate/Rezumat PN 23 37 01 04 - faza 4

Cercetări privind realizarea aliajelor/compozitelor pentru depuneri dure și îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și funcționale ale acestora prin tratamente termice

1. Obiectivul proiectului:

Obiectivul general al proiectului este dezvoltarea unor materiale funcționale avansate și a unor tehnologii de fabricație destinate realizării de straturi dure și extradure cu proprietăți mecanice și funcționale superioare, aplicabile componentelor supuse unor solicitări mecanice, termice și tribologice severe. În acest scop, proiectul urmărește dezvoltarea, optimizarea și validarea la nivel de laborator a unor tehnologii de depunere cu fascicul laser a materialelor de tip aliaj metalic, compozit sau cermet, precum și acumularea know-how-ului necesar corelării dintre compoziția materialelor, parametrii procesului de depunere, microstructura și caracteristicile funcționale ale straturilor obținute.

Un obiectiv complementar al proiectului îl reprezintă dezvoltarea infrastructurii de cercetare necesare implementării programelor experimentale, astfel încât pregătirea probelor, a epruvetelor și a materialelor substrat să poată fi realizată controlat și cu precizie, inclusiv în cazul materialelor dure, extradure sau dificil de prelucrat prin procedee convenționale. Infrastructura dezvoltată în etapele anterioare asigură fluxul experimental necesar realizării, prelucrării și evaluării probelor cu straturi depuse.

În cadrul Fazei 4, obiectivul proiectului este urmărit prin trecerea de la dezvoltarea infrastructurii experimentale la dezvoltarea propriu-zisă a materialelor destinate depunerilor dure. Activitățile fazei au vizat cercetări privind realizarea de materiale avansate dure sau extradure, prepararea unor amestecuri de pulberi metalice și compozite de tip metal-carbură, testarea acestora prin realizarea de straturi depuse cu ajutorul tehnologiilor laser, precum și conceperea și implementarea unui program experimental destinat îmbunătățirii caracteristicilor mecanice și funcționale ale straturilor prin tratament termic post-depunere.

Prin aceste activități se realizează prima verigă a corelației urmărite la nivelul întregului proiect: compoziția amestecului de pulberi – comportarea la topire și solidificare în baia metalică generată de fasciculul laser – integritatea și microstructura stratului depus – caracteristicile mecanice și funcționale rezultate. Datele obținute constituie baza obiectivă de selecție a materialelor care vor fi caracterizate complex, tratate termic și optimizate în etapele următoare ale proiectului.

Obiectivul proiectului se încadrează în direcțiile strategice ale Programului Nucleu privind dezvoltarea de materiale funcționale inovative, fabricația avansată și ecotehnologiile. Prin implementarea activităților propuse se urmărește extinderea gamei de materiale procesabile prin tehnologii laser, creșterea duratei de viață a componentelor exploatate în condiții severe de uzură și coroziune și crearea unui flux experimental integrat, de la prepararea materialelor și pregătirea probelor până la realizarea, caracterizarea, optimizarea și validarea straturilor dure și extradure.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Pentru atingerea obiectivului general al proiectului au fost preconizate rezultate tehnice, experimentale, științifice și de diseminare, orientate către dezvoltarea materialelor pentru depuneri dure, a tehnologiilor de procesare cu fascicul laser și a soluțiilor de valorificare a acestora în mediul industrial.

Principalul grup de rezultate tehnice îl constituie **tehnologiile de procesare cu laser a suprafețelor pentru materialele investigate**, prin care sunt stabilite materialele de aport, parametrii de proces și condițiile de realizare a straturilor dure. Aceste rezultate presupun proiectarea și prepararea materialelor de aport, realizarea efectivă a depunerilor pe substraturi reprezentative și verificarea fezabilității tehnologice a fiecărei combinații de materiale.

Un rezultat distinct îl reprezintă **programul experimental în vederea optimizării tehnologiilor**, prin care sunt stabilite variabilele de proces și de tratament termic, domeniile de variație ale acestora, indicatorii măsurabili de evaluare a straturilor și modul de prelucrare a datelor experimentale. Programul are rolul de a transforma observațiile experimentale în criterii cantitative de selecție și de optimizare.

În strânsă legătură cu acestea au fost preconizate, **încercări și evaluări pentru materialele investigate**, care cuprind rezultatele măsurătorilor de duritate, ale examinărilor macroscopice și microstructurale, ale încercărilor de uzură și de coroziune, precum și interpretarea acestora.

Rezultatele științifice preconizate la nivelul proiectului includ minimum douăsprezece publicații științifice, minimum o cerere de brevet de invenție și participări la conferințe naționale și internaționale. Diseminarea și valorificarea sunt asigurate prin pagina web a proiectului, prin materiale și activități de promovare și prin implementarea soluției tehnice de durificare către mediul industrial.

Rezultatele de raportare preconizate cuprind rapoartele de cercetare și rapoartele de activitate aferente fiecărei faze, rapoartele anuale ale proiectului și raportul de finalizare. Acestea asigură trasabilitatea activităților, a rezultatelor obținute și a gradului de îndeplinire a indicatorilor asumați.

Rezultatele preconizate sunt corelate între ele și converg către obiectivul general al proiectului: obținerea unei tehnologii de depunere cu fascicul laser validate la nivel de laborator, aplicabilă componentelor industriale supuse uzurii abrazive, erozive și adezive, precum și coroziunii la temperaturi ridicate. Grupul țintă vizat este format din firme producătoare de componente pentru industria energetică, aerospațială și automotive, precum și din unitățile de cercetare interesate de ingineria suprafețelor.

În conformitate cu schema de realizare a proiectului, rezultatele asociate Fazei 4 sunt:

- materiale (aliaje și compozite) pentru depuneri dure, obținute din amestecuri de pulberi;
- tehnologii preliminare de procesare cu laser a suprafețelor materialelor investigate;
- încercări și evaluări pentru materialele investigate;
- două lucrări științifice;
- actualizarea paginii web cu rezultatele fazei;
- materiale și activități de promovare;
- raportul de cercetare și raportul de activitate ale fazei.

3. Obiectivul fazei:

Obiectivul Fazei 4 a constat în realizarea și testarea unor aliaje și compozite destinate depunerilor dure, obținute din amestecuri de pulberi, precum și în stabilirea căilor de îmbunătățire a caracteristicilor mecanice și funcționale ale straturilor depuse prin tratamente termice.

În cadrul fazei s-a urmărit proiectarea unor amestecuri de pulberi bazate pe mecanisme de durificare diferite și complementare: durificarea prin fază dură dispersată, asigurată de carbura de wolfram; durificarea și rezistența la uzură și coroziune la cald, asigurate de matricea pe bază de cobalt de tip Stellite 6; durificarea prin precipitare, asigurată de componenta din oțeluri maraging; respectiv formarea in situ a carburilor de titan, prin adaos de aliaj Ti-6Al-4V. Prin combinarea acestora s-a urmărit identificarea raportului optim între duritate, integritatea stratului și potențialul de durificare ulterioară prin tratament termic.

Un obiectiv tehnic esențial al fazei I-a constituit testarea efectivă a amestecurilor prin realizarea de straturi depuse cu ajutorul tehnologiilor laser, pe substrat din oțel de uz general. S-a urmărit verificarea fezabilității tehnologice a fiecărui amestec în condiții identice de pregătire a suprafeței și de proces, astfel încât diferențele de comportare observate să poată fi atribuite în principal compoziției. În acest scop au fost stabilite și consemnate configurațiile de alimentare cu pulbere, debitele de gaz, puterea nominală a fasciculului și regimul de control adaptiv al puterii în funcție de înălțimea măsurată a stratului.

Faza a urmărit, de asemenea, evaluarea straturilor obținute prin două categorii complementare de examinări: măsurarea microdurității Vickers pe suprafața rectificată și examinarea microscopică detaliată la stereomicroscop. Prin această abordare s-a avut în vedere depășirea limitelor unui criteriu unic de selecție, întrucât duritatea ridicată nu garantează integritatea stratului, iar un strat integru poate avea o duritate insuficientă pentru aplicațiile vizate.

Pe baza rezultatelor obținute, obiectivul fazei a inclus selectarea fundamentată a amestecurilor care vor fi utilizate în etapele următoare și eliminarea celor incompatibile metalurgic sau lipsite de perspectivă tehnologică, împreună cu justificarea tehnică a fiecărei decizii.

Un obiectiv distinct al fazei I-a constituit conceperea și implementarea programului experimental privind tratamentul termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser. Programul a fost construit pornind de la cele șapte depuneri preliminare realizate și de la comportarea observată a acestora, urmărind stabilirea probelor de referință, a mecanismelor metalurgice asupra cărora poate acționa tratamentul termic laser post-depunere, a variabilelor de răspuns măsurabile, a măsurilor tehnologice complementare aplicabile la depunere și a condițiilor de comparabilitate a rezultatelor înainte și după tratament.

Faza a inclus și obiective de natură științifică și documentară: elaborarea a două lucrări științifice, diseminarea rezultatelor prin actualizarea paginii web cu raportul tehnic și cu stadiul actual al proiectului, precum și elaborarea raportului de cercetare și a raportului de activitate ale fazei.

Prin realizarea acestor activități, faza a avut rolul de a furniza materialele, parametrii de proces și datele experimentale de intrare necesare etapei următoare a proiectului, dedicată caracterizării complexe a straturilor depuse prin analize structurale și încercări mecanice de duritate, la uzură și la coroziune.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Pentru atingerea obiectivului Fazei 4 au fost preconizate rezultate materiale, experimentale, documentare și de diseminare, corelate cu realizarea și testarea materialelor pentru depuneri dure și cu fundamentarea tratamentului termic post-depunere.

Primul rezultat preconizat I-a constituit **realizarea materialelor pentru depuneri dure din pulberi**, respectiv proiectarea și prepararea prin dozare gravimetrică a unui set de amestecuri cu compoziții diferite, acoperind

un domeniu larg al raportului dintre faza dură și matricea metalică, precum și un amestec de referință format exclusiv din aliaje metalice.

Un al doilea rezultat preconizat a fost **testarea amestecurilor prin realizarea de straturi depuse dure cu ajutorul tehnologiilor laser**, prin executarea depunerilor pe un substrat comun, în condiții identice de pregătire a suprafeței și de proces, urmată de prelucrarea mecanică a suprafeței în vederea obținerii unei suprafețe de referință pentru măsurători.

A fost preconizată stabilirea și consemnarea **setului de parametri de proces** utilizați la depunere – configurațiile de alimentare cu pulbere, debitele gazului purtător, ale gazului coaxial și ale gazului de protecție, puterea nominală a fasciculului laser și tabela de corelare dintre înălțimea măsurată a stratului și puterea laser – astfel încât rezultatele să fie reproductibile și utilizabile în etapele de optimizare.

Rezultatele preconizate au inclus **evaluarea straturilor obținute** prin măsurători de microduritate Vickers și prin examinare microscopică detaliată, cu identificarea și clasificarea discontinuităților, evaluarea integrității, a aderenței, a stării marginilor și a urmelor procesului de depunere, precum și corelarea acestor observații cu compoziția amestecurilor și cu valorile de duritate măsurate.

Pe această bază a fost preconizată **selectarea amestecurilor** care vor fi utilizate în etapele următoare, cu justificarea tehnică a selecției și cu eliminarea variantelor incompatibile metalurgic sau lipsite de perspectivă tehnologică.

Un rezultat important preconizat l-a constituit **programul experimental privind tratamentul termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser**, cuprinzând mecanismele metalurgice vizate, variabilele de răspuns măsurabile, măsurile tehnologice complementare aplicabile la depunere și condițiile de comparabilitate a examinărilor efectuate înainte și după tratament.

Au fost preconizate, de asemenea, rezultate științifice și de diseminare: elaborarea a două lucrări științifice, actualizarea paginii web cu raportul tehnic și cu stadiul actual al proiectului, elaborarea materialelor de promovare și întocmirea raportului de cercetare și a raportului de activitate ale fazei.

Sintetic, rezultatele preconizate pentru Faza 4 au fost:

- amestecuri de pulberi proiectate și preparate pentru depuneri dure;
- straturi dure depuse prin tehnologii laser preliminare pe substrat metalic;
- set de parametri de proces stabiliți și consemnați;
- rezultatele măsurărilor de microduritate;
- rezultatele examinării macroscopice a straturilor depuse;
- selecția fundamentată a amestecurilor pentru etapele următoare;
- program experimental privind tratamentul termic al straturilor depuse;
- două lucrări științifice;
- actualizarea paginii web cu raportul tehnic și stadiul proiectului;
- materiale de promovare;
- raportul de cercetare și raportul de activitate ale fazei.

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

Faza 4, intitulată „Cercetări privind realizarea aliajelor/compozitelor pentru depuneri dure și îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și funcționale ale acestora prin tratamente termice”, a avut ca obiectiv principal realizarea și testarea materialelor destinate straturilor dure depuse prin tehnologii laser, precum și fundamentarea căilor de îmbunătățire a caracteristicilor acestora prin tratament termic post-depunere. Activitățile au fost orientate către proiectarea și prepararea amestecurilor de pulberi, realizarea efectivă a depunerilor, evaluarea straturilor obținute și stabilirea programului experimental pentru etapele următoare.

Programul experimental realizat în cadrul fazei a avut caracter de triere: s-a urmărit identificarea combinațiilor de pulberi care conduc la straturi continue, compacte, aderente și cu duritate ridicată, eliminarea celor incompatibile metalurgic și fundamentarea selecției compozițiilor pentru etapele de caracterizare structurală, de tratament termic post-depunere și de evaluare a comportării funcționale.

Materialul de bază, pulberile utilizate și proiectarea amestecurilor

Ca substrat a fost utilizată o placă din oțel de uz general S355 (SR EN 10025-2), cu grosimea de 5 mm. Oțelul S355 are structură ferito-perlitică, un conținut de carbon de maximum 0,20–0,24%, mangan de până la 1,6% și o duritate uzuală de ordinul 150–200 HV, fiind reprezentativ pentru componentele industriale care necesită protecție la uzură prin acoperiri dure. Grosimea redusă a plăcii implică o capacitate limitată de evacuare a căldurii, ceea ce favorizează acumularea termică între depuneri succesive și deformarea plăcii.

Pregătirea suprafeței a constat în sablare urmată de degresare. Sablarea îndepărtează oxizii de laminare și produșii de coroziune și crește rugozitatea și, implicit, absorbția radiației laser în faza inițială a interacțiunii, iar degresarea elimină contaminanții organici care pot genera porozitate gazoasă în baia metalică. Pregătirea a fost identică pentru toate cele șapte depuneri, astfel încât diferențele de comportare observate pot fi atribuite în principal compoziției amestecurilor.

Au fost utilizate două familii de pulberi, diferite prin natura constituenților și prin mecanismele de durificare vizate. Familia aliajelor metalice, utilizată pentru amestecul de referință M0, a cuprins: oțel inoxidabil superduplex 2507 ($\approx 25\text{Cr}-7\text{Ni}-4\text{Mo}-0,27\text{N}$, rest Fe), cu structură bifazică ferito-austenitică; superaliaj pe bază de nichel 718 ($\approx 53\text{Ni}-19\text{Cr}-18\text{Fe}-5\text{Nb}-3\text{Mo}-0,9\text{Ti}$), durificabil prin precipitare; superaliaj pe bază de nichel 625 ($\approx 61\text{Ni}-21,5\text{Cr}-9\text{Mo}-3,6\text{Nb}$), durificat prin soluție solidă; titan comercial pur CP-Ti; oțel inoxidabil austenitic 316L ($\approx 17\text{Cr}-12\text{Ni}-2,5\text{Mo}$, rest Fe, $\text{C} \leq 0,03\%$).

Familia sistemelor compozite metal-carbură, utilizată pentru amestecurile M1–M6, a cuprins:

- Metco 1220B – aliaj pe bază de cobalt de tip Stellite 6 ($\text{Co}-28,5\text{Cr}-4,5\text{W}-1,6\text{Si}-1,1\text{C}$, $\text{Fe} \leq 3\%$), cu granulația $-106 +45 \mu\text{m}$, destinat placării laser și PTA; depunerile rezistă la gripare, cavitație și uzură adezivă, abrazivă și erozivă, inclusiv în condiții de coroziune la temperaturi ridicate;
- WOKA 3108 – pulbere $88\text{WC}-12\text{Co}$ obținută prin aglomerare și sinterizare, cu morfologie sferoidală, granulația $-90 +45 \mu\text{m}$ și densitatea aparentă de $4,7-5,3 \text{ g/cm}^3$;
- MAR-60HRC – oțel maraging de duritate ultra-ridică dezvoltat pentru fabricația aditivă ($\approx 13\text{Ni}-15\text{Co}-10\text{Mo}-0,2\text{Ti}$, rest Fe), care atinge circa 740 HV în stare îmbătrânită;
- 18Ni300 – oțel maraging clasic ($\approx 18\text{Ni}-9\text{Co}-5\text{Mo}-0,7\text{Ti}$, rest Fe), cu duritate de circa 590 HV în stare îmbătrânită și tenacitate superioară;

- Ti-6Al-4V Grade 5 – aliaj de titan $\alpha+\beta$, utilizat ca sursă de titan pentru formarea in situ a carburii de titan (TiC).

Granulațiile pulberilor Metco 1220B, WOKA 3108 și MAR-60HRC sunt apropiate, ceea ce favorizează transportul simultan prin sistemul de alimentare și reduce segregarea granulometrică. Trebuie remarcat însă că pulberea WOKA 3108 este concepută pentru pulverizare termică, nu pentru topire laser, iar structura sa aglomerat-sinterizată prezintă porozitate internă ce poate elibera gaze în baia metalică.

Fiecare amestec a fost preparat prin dozare gravimetrică, în loturi de 10 g. Amestecurile M1–M6 au fost proiectate după o logică progresivă: diluarea treptată a fazei dure WC–Co cu o matrice maraging tratabilă termic, respectiv introducerea titanului în vederea formării de carburi in situ. Frațiile de WC indicate se referă la amestecul de pulberi, nu la depunere, întrucât în baia metalică WC se dizolvă parțial. Compoziția amestecurilor este prezentată în tabelul 1.

Tabelul 1. Compoziția amestecurilor de pulberi utilizate la depunerile preliminare

Amestec	Compoziția amestecului [% masă]	WC în amestec [% masă]	Caracteristica vizată
M0	20% 2507 + 20% 718 + 20% 625 + 20% CP-Ti + 20% 316L	–	amestec de referință, exclusiv aliaje metalice
M1	40% Metco 1220B + 60% WOKA 3108	52,8 ($\approx 38\%$ vol.)	maxim de carburi, fără componentă maraging
M2	35% Metco 1220B + 50% WOKA 3108 + 15% MAR-60HRC	44,0 ($\approx 30\%$ vol.)	carburi ridicate, matrice parțial tratabilă
M3	35% Metco 1220B + 40% WOKA 3108 + 20% MAR-60HRC + 5% 18Ni300	35,2 ($\approx 23\%$ vol.)	matrice maraging tratabilă (25%)
M4	30% Metco 1220B + 30% WOKA 3108 + 30% MAR-60HRC + 10% 18Ni300	26,4 ($\approx 16\%$ vol.)	maraging dominant (40%), cu carburi
M5	30% Metco 1220B + 35% WOKA 3108 + 20% MAR-60HRC + 5% 18Ni300 + 10% Ti-6Al-4V	30,8 ($\approx 9\%$ Ti)	formare in situ de TiC – variantă exploratorie
M6	30% Metco 1220B + 35% WOKA 3108 + 20% MAR-60HRC + 10% 18Ni300 + 5% Ti-6Al-4V	30,8 ($\approx 4,6\%$ Ti)	sistem complex, raport Ti/C mai favorabil

Pe baza compozițiilor nominale, compoziția globală estimată a amestecului de referință M0 este de $\approx 30\%$ Fe, $\approx 27\%$ Ni, $\approx 16,5\%$ Cr, $\approx 20\%$ Ti ($\approx 23\%$ at.), $\approx 3,7\%$ Mo și $\approx 1,7\%$ Nb. Este amestecul cel mai eterogen din punct de vedere chimic, întrucât combină cinci aliaje aparținând la patru baze metalurgice distincte, fără un element de bază comun. În cazul amestecului M5, datorită densității reduse a aliajului Ti-6Al-4V ($\approx 4,4 \text{ g/cm}^3$), cele 10% masice reprezintă circa 20% din volumul amestecului.

Echipamentul, parametrii de proces și execuția depunerilor

Depunerile au fost executate cu echipamentul de depunere laser DED din dotarea ISIM, prin procedeul de depunere directă cu energie concentrată cu fascicul laser (DED-LB). Materialul de aport este transportat cu gaz și injectat coaxial în zona de interacțiune cu fasciculul laser, unde se topește împreună cu un strat superficial al substratului, formând baia metalică din care rezultă stratul depus. Regimul de lucru al echipamentului include un sistem de monitorizare a înălțimii stratului depus, corelat cu puterea fasciculului laser printr-o tabelă de corespondență cu zece trepte, ceea ce permite corectarea automată a aportului energetic în funcție de geometria stratului format.

Configurațiile de alimentare cu pulbere și parametrii de proces utilizați sunt prezentați în tabelul 2, iar tabela de corelare dintre înălțimea măsurată și puterea laser în tabelul 3.

Tabelul 2. Parametrii de proces utilizați la realizarea depunerilor preliminare

Configurația de pulbere	Masă țintă programată [g]	Debite de gaz: pulbere / coaxial / protecție [l/min]	Putere nominală [W]	Domeniul de reglare al puterii [W]
Metco 1220B (Stellite 6)	4,00	8,0 / 8,0 / 10,0	250	185–364
Amestecuri de pulberi preparate (MIX_MATERIALS)	10,00	8,0 / 8,0 / 10,0	225	170–322
WOKA 3108 (88WC–12Co)	2,00	8,0 / 8,0 / 10,0	225	170–300

Tabelul 3. Corelarea dintre înălțimea măsurată a stratului și puterea fasciculului laser

Înălțime măsurată [mm]	Putere laser – Metco 1220B [W]	Putere laser – amestecuri preparate [W]	Putere laser – WOKA 3108 [W]
0,174	185	170	170
0,158	233	205	205
0,142	250	225	225
0,126	267	239	240
0,110	285	253	255
0,094	300	267	267
0,078	317	281	278
0,062	331	294	286
0,046	358	308	294
0,000	364	322	300

Corelarea inversă dintre înălțimea măsurată și puterea comandată asigură compensarea automată a abaterilor de geometrie: la o înălțime mare a stratului, aportul energetic este redus, pentru a limita supratopirea și diluția, iar la o înălțime scăzută puterea crește, pentru a asigura topirea completă a pulberii și legătura metalurgică cu stratul anterior. Debitele de gaz au fost menținute identice pentru toate configurațiile, astfel încât condițiile de transport al pulberii și de protecție a băii metalice să nu constituie o variabilă suplimentară între probe.

Pe placa de substrat au fost executate șapte depuneri pătrate cu latura nominală de 12 mm și grosimea de circa 1 mm, prin trasarea de rânduri paralele cu suprapunere laterală. Depunerea M0 a fost amplasată separat, în colțul din stânga sus al zonei de lucru, iar probele M1–M3 și M4–M6 au fost dispuse în două rânduri, cu distanțe între depuneri comparabile cu latura acestora. Realizarea depunerilor este ilustrată în figura 1.

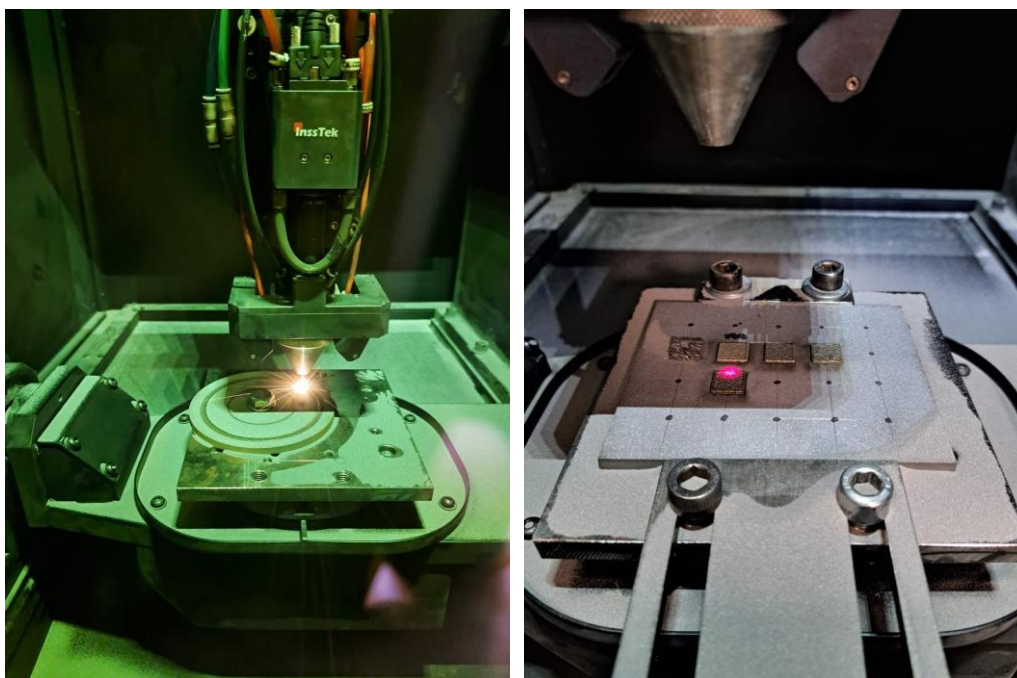


Figura 1. Realizarea depunerilor preliminare: a) interacțiunea fascicul laser – pulbere în timpul procesului de depunere; b) placa de substrat fixată pe masa echipamentului, cu depunerile executate și poziționarea depunerii următoare

După depunere, suprafața probelor a fost rectificată plan, în vederea obținerii unei suprafețe de referință adecvate măsurătorilor de duritate. Operația de rectificare constituie totodată un test tehnologic calitativ al aderenței și coeziunii stratului, care este supus solicitărilor mecanice generate de forțele de așchiere și solicitărilor termice datorate încălzirii locale în zona de contact cu discul abraziv. Aspectul plăcii după rectificare este prezentat în figura 2.

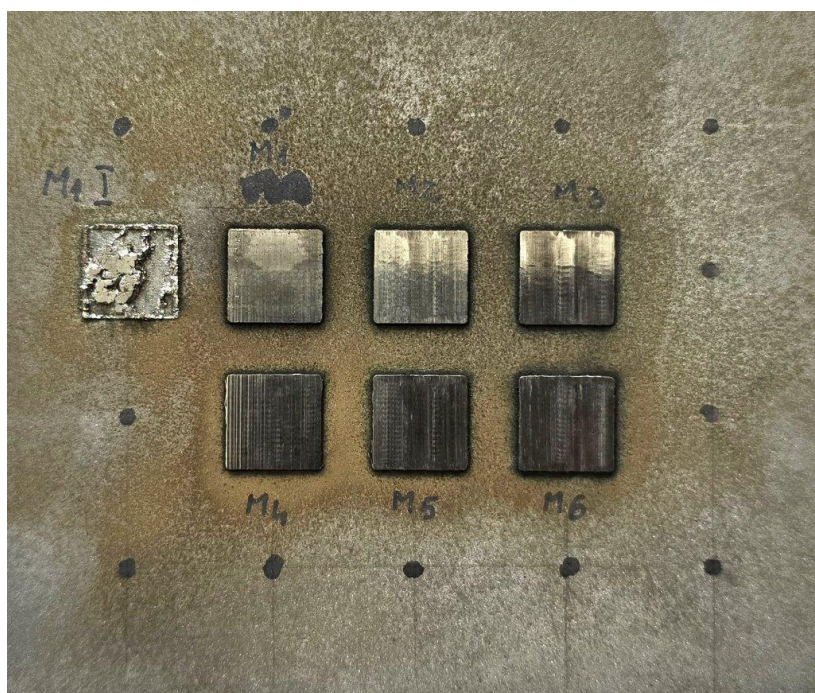


Figura 2. Placa de substrat din oțel S355 cu depunerile preliminare M0–M6, după rectificarea plană

În jurul grupului M1–M6 se observă un halou continuu de culoare galben-brună, extins pe câțiva milimetri dincolo de conturul depunerilor. Acesta este format din pelicule subțiri de oxizi generate pe suprafața sablată încălzită în aer, la care se adaugă particulele fine condensate din pana de vapori și pulberea necaptată de baia metalică, bogate în oxizi de cobalt și wolfram. Continuitatea haloului peste întregul grup indică acumularea termică între depunerile succesive. În jurul probei M0 colorația este mai slabă, ceea ce sugerează un regim termic și de emisii diferit.

Stratul depunerii M0 este în mare parte desprins de pe substrat: au rămas fragmente metalice lucioase, cu contur neregulat, parțial ridicate față de suprafață, o zonă centrală mată, cenușie, și un bordaj rezidual zimțat pe perimetru. Modul de cedare este mixt – adeziv, la interfața strat–substrat, și coeziv, prin fragmentarea stratului. În schimb, toate cele șase depuneri M1–M6 sunt integre și continue după rectificare, fără exfolieri, ciupiri de margine sau desprinderi, cu muchii drepte și bine definite, ceea ce arată că nivelul coeziunii stratului și al aderenței la substrat a fost suficient pentru a suporta solicitările rectificării.

Rezultatele măsurătorilor de microduritate

Microduritatea straturilor a fost determinată prin metoda Vickers, pe suprafața rectificată, cu sarcina de 49,03 N (HV5), câte cinci amprente pe fiecare probă. La duritățile măsurate (421–1288 HV5), diagonală amprente este de circa 85–150 μ m, iar adâncimea de pătrundere de circa 12–21 μ m. Grosimea stratului ($\approx$ 1 mm) depășește astfel cu mult grosimea minimă impusă de SR EN ISO 6507-1, iar substratul nu influențează rezultatul. Amprenta cuprinde simultan particule de carbură și matrice metalică, astfel încât valoarea HV5 caracterizează duritatea globală a compozitului și este adecvată comparării amestecurilor între ele. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 4 și ilustrate în figura 3.

Tabelul 4. Rezultatele măsurătorilor de microduritate HV5 pe probele preliminare

Proba	HV5 = 1	HV5 = 2	HV5 = 3	HV5 = 4	HV5 = 5	Medie HV5	Abatere standard	CV [%]	WC în amestec [% masă]
M0	644	686	652	698	673	671	22,6	3,4	=
M1	1288	1097	947	947	947	1045	150,5	14,4	52,8
M2	1097	924	947	1033	924	985	77,0	7,8	44,0
M3	724	642	642	724	724	691	44,9	6,5	35,2
M4	421	514	572	421	514	488	65,9	13,5	26,4
M5	514	548	724	572	572	586	80,7	13,8	30,8
M6	514	514	514	536	572	530	25,3	4,8	30,8

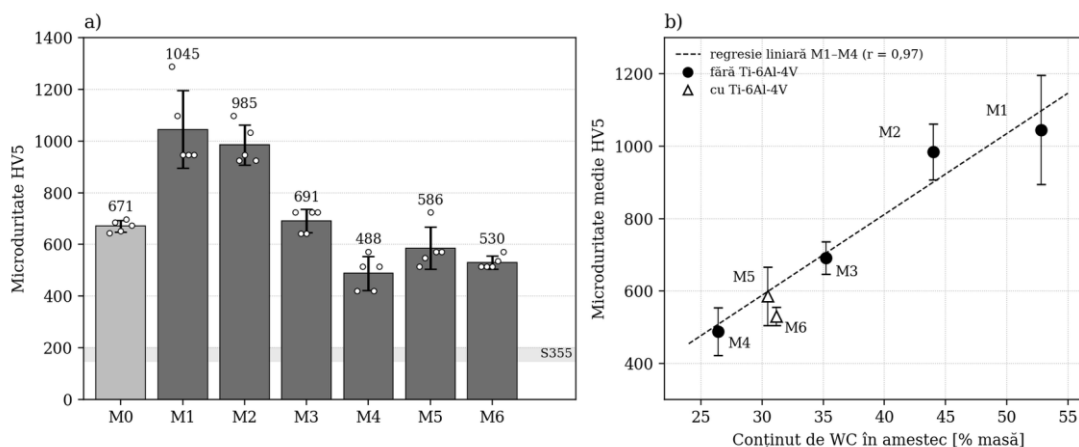


Figura 3. Microdurețea HV5 a probelor preliminare: a) valori medii și abatere standard (punctele reprezintă măsurătorile individuale); b) variația microdureții medii în funcție de conținutul de WC din amestec (M1–M6)

Ordinea descrescătoare a microdureții medii este M1 (1045 HV5) > M2 (985 HV5) > M3 (691 HV5) > M0 (671 HV5) > M5 (586 HV5) > M6 (530 HV5) > M4 (488 HV5). Toate straturile depășesc de 2,4 până la 7 ori duritatea substratului S355. Pe baza nivelului de duritate se disting trei grupe: grupa de duritate foarte ridicată, M1 și M2, cu valori medii de circa 1000 HV5; grupa de duritate intermediară, M3 și M0, cu circa 670–690 HV5; grupa de duritate moderată, M5, M6 și M4, cu 488–586 HV5.

Coeficienții de variație se situează între 3,4% și 14,4%. Dimensiunea amprentelor HV5 este comparabilă cu granulația pulberii WC–12Co și cu scara neomogenităților dintre rânduri, astfel încât dispersia reflectă direct neomogenitatea structurală a stratului. Cele mai mari valori ale coeficientului de variație apar la M1, unde valorile maxime corespund amprentelor plasate în aglomerări locale de carburi, la M4, unde valorile minime corespund zonelor bogate în componentă maraging nedurificată, și la M5, unde segregarea pulberii Ti-6Al-4V, de densitate redusă, generează zone locale cu conținut diferit de fază dură. Cea mai mică dispersie a fost înregistrată la M0 (3,4%), a cărei structură, deși fragilă, este dominată de faze intermetalice distribuite cvasi-uniform, și la M6 (4,8%).

Examinarea macroscopică a straturilor depuse

Examinarea macroscopică detaliată a fost efectuată pe suprafața rectificată a celor șapte probe, la stereomicroscop, în lumină reflectată, cu sistem de achiziție și măsurare a imaginii. Examinarea a urmărit evaluarea integrității straturilor, identificarea și clasificarea discontinuităților (fisuri, pori, cavități, ciupiri de margine), caracterizarea urmelor lăsate de procesul de depunere și de rectificare, precum și verificarea poziției și a aspectului amprentelor de microdurete. Observațiile au fost corelate cu compoziția amestecurilor și cu valorile de duritate determinate anterior.

Dimensiunile măsurate ale depunerilor sunt cuprinse între 12,68 și 12,81 mm, față de latura nominală de 12 mm. Supradimensionarea sistematică, de 0,68–0,81 mm (5,7–6,8%), corespunde unei extinderi de circa 0,35–0,40 mm pe fiecare latură și se explică prin faptul că conturul programat definește traiectoria centrului spotului laser pe rândurile extreme, în timp ce baia metalică se extinde lateral cu aproximativ jumătate din lățimea sa. Pentru obținerea unor dimensiuni finale apropiate de cele nominale este necesară compensarea traiectoriei cu această valoare. Abaterea dimensională între probe este de numai $\pm 0,07$ mm, ceea ce arată

că lățimea băii metalice a fost stabilă și practic independentă de compoziția amestecului, deși proprietățile optice și termofizice ale pulberilor diferă semnificativ.

Pe toate probele sunt vizibile trei categorii de urme suprapuse: zgârieturi fine, paralele și continue, orientate pe o singură direcție, identică pentru toate probele – urmele granulelor abrazive ale discului de rectificare; benzi longitudinale cu contrast diferit, cu lățimi de ordinul milimetrilor, paralele cu direcția rândurilor de depunere, care corespund axelor rândurilor și zonelor de suprapunere, cu istorii termice diferite; striaii transversale periodice în interiorul unor benzi, care reprezintă urmele fronturilor succesive de solidificare ale băii metalice. Pe fiecare probă, cele cinci amprente HV5 sunt dispuse pe un singur rând, în zona centrală, la jumătatea înălțimii depunerii, cu pasul de circa 2 mm și la minimum 2 mm de margini, condițiile impuse de SR EN ISO 6507-1 fiind respectate cu o marjă largă.

Proba M0 – amestec de referință 2507 / 718 / 625 / CP-Ti / 316L. Conturul depunerii (12,72 × 12,75 mm) este definit în principal de fragmentele de strat rămase aderente pe perimetru. Suprafața prezintă o zonă centrală de strat păstrat și rectificat, fragmentată de o rețea poligonală de fisuri interconectate în fragmente de ordinul 0,5–2 mm, zone extinse cu aspect mat, cenușiu, granular, situate sub nivelul stratului – suprafața de rupere rămasă după desprindere – și un bordaj perimetral de material fragmentat. Pe pereții fisurilor și în cavitățile rămase apar colorații de interferență albastre, violete și aurii, respectiv pelicule de oxizi formate la temperaturi de câteva sute de grade Celsius; rezultă că fisurile s-au format și s-au deschis în timpul depunerii sau al răcirii, nu în timpul rectificării. Morfologia confirmă mecanismul de fragilizare prin compuși intermetalici Fe–Ti, Ni–Ti și Cr–Ti.



Figura 4. Proba M0 după rectificare – exfoliere extinsă și rețea poligonală de fisuri

Proba M1 – WC/Co–Stellite, maxim carburi (≈52,8% WC). Depunerea (12,72 × 12,78 mm) este continuă și compactă. Pe întreaga suprafață, cu intensitate mai mare în zona centrală și inferioară, se observă o rețea fină de fisuri interconectate, sinuoase, fără orientare preferențială, cu celule de ordinul 1–2 mm, tipică fisurării la rece a compozitelor cu fracție mare de carburi supuse tensiunilor termice biaxiale la răcire. Suprafața prezintă numeroase puncte întunecate fine, reprezentând micropori și locuri de smulgere a particulelor de carbură la rectificare. Ampretele HV5 au dimensiunile cele mai mici dintre toate probele și

se disting greu de microporii din jur, în concordanță cu microdureitatea maximă. Proba M1 reunește duritatea maximă cu cel mai ridicat grad de fragilitate din sistemele cu carburi.

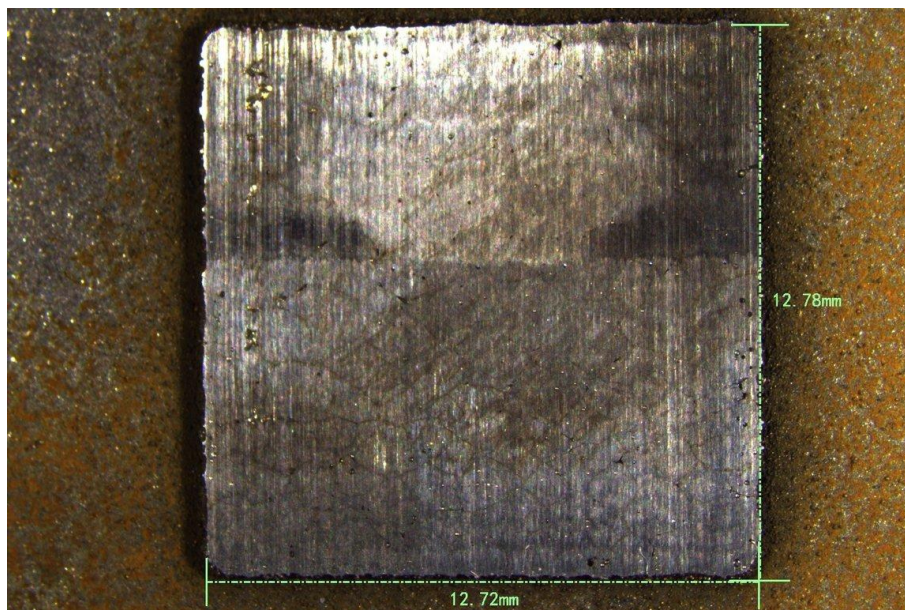


Figura 5. Proba M1 după rectificare – rețea fină de fisuri și microporozitate

Proba M2 – WC/Co–Stellite–maraging ($\approx 44,0\%$ WC). Depunerea ($12,79 \times 12,69$ mm) este continuă, cu benzile longitudinale ale rândurilor de depunere clar delimitate prin contrast. Pe întreaga suprafață se extinde o rețea fină de fisuri poligonale, cu celule de ordinul 1–3 mm, care traversează rândurile fără orientare preferențială. Microporii sunt mult mai rari decât la M1, iar marginile sunt curate. Rândul de cinci amprente HV5 din zona centrală este clar vizibil, cu amprente rombice mici, bine conturate. Distribuția uniformă a fisurilor și dispersia moderată a durității indică o distribuție mai omogenă a fazei dure decât la M1.

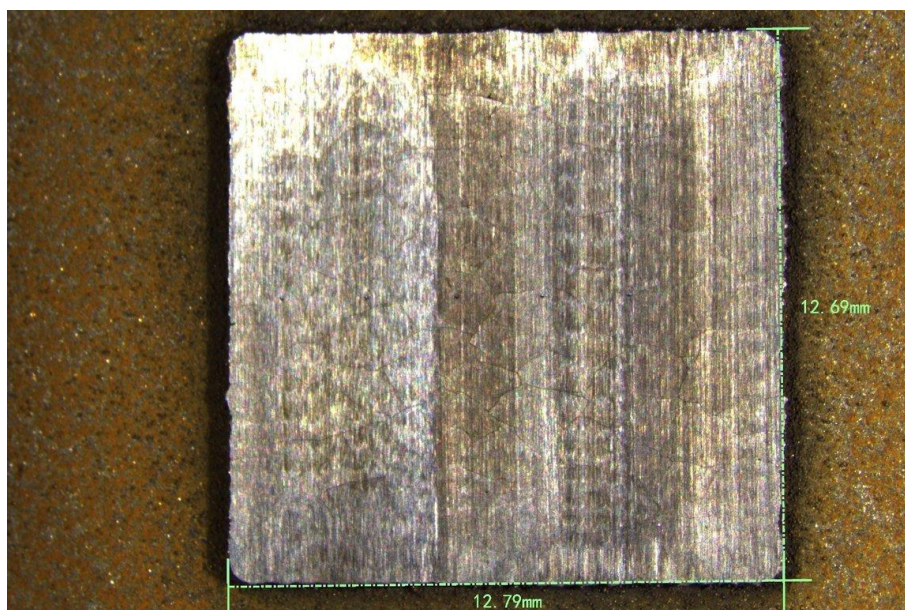


Figura 6. Proba M2 după rectificare – rețea fină de fisuri și rândul de amprente HV5 din zona centrală

Proba M3 – matrice maraging tratabilă ($\approx 35,2\%$ WC). Depunerea ($12,75 \times 12,74$ mm) prezintă benzi longitudinale bine conturate, iar în unele benzi apar striații transversale periodice care corespund undulațiilor de solidificare. Morfologia fisurării diferă de M1 și M2: în locul rețelei fine se observă câteva

fisuri lungi, sinuoase, orientate predominant longitudinal, paralel cu rândurile de depunere, cu ramificații transversale scurte, deschidere vizibilă și lărgiri locale. Poziția și orientarea lor sugerează localizarea în zonele de suprapunere dintre rânduri, mai slabe din cauza reîncălzirii repetate și a segregărilor. Componenta maraging conferă matricei o capacitate mai mare de deformare, ceea ce împiedică formarea rețelei fine, deformația concentrându-se însă în câteva fisuri.

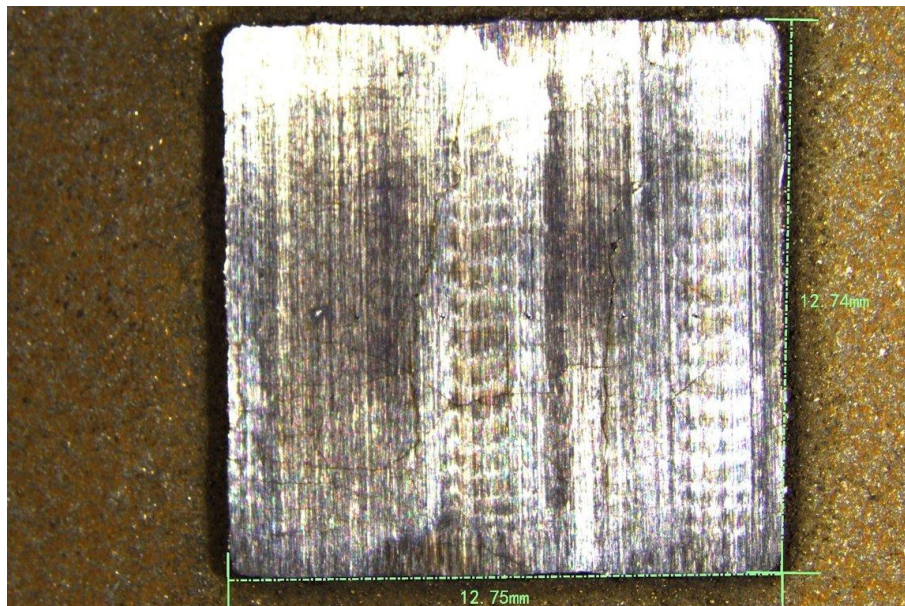


Figura 7. Proba M3 după rectificare – fisuri longitudinale deschise și ondulații de solidificare

Proba M4 – maraging dominant, cu carburi ($\approx 26,4\%$ WC). Depunerea ($12,76 \times 12,81$ mm) are o suprafață uniformă, cenușie, compactă, cu ondulații de solidificare slab vizibile în jumătatea inferioară. La mărirea utilizată nu se observă fisuri sau pori, singurul defect fiind o creștătură locală mică pe latura stângă. Amprente HV5 sunt cele mai mari și cele mai bine definite, cu laturi drepte și fără fisuri la colțuri, ceea ce indică un răspuns elastoplastic al matricei. Proba M4 are cea mai bună integritate, dar și cea mai mică microduritate, confirmând relația inversă dintre duritatea compozitului și rezistența sa la fisurare.

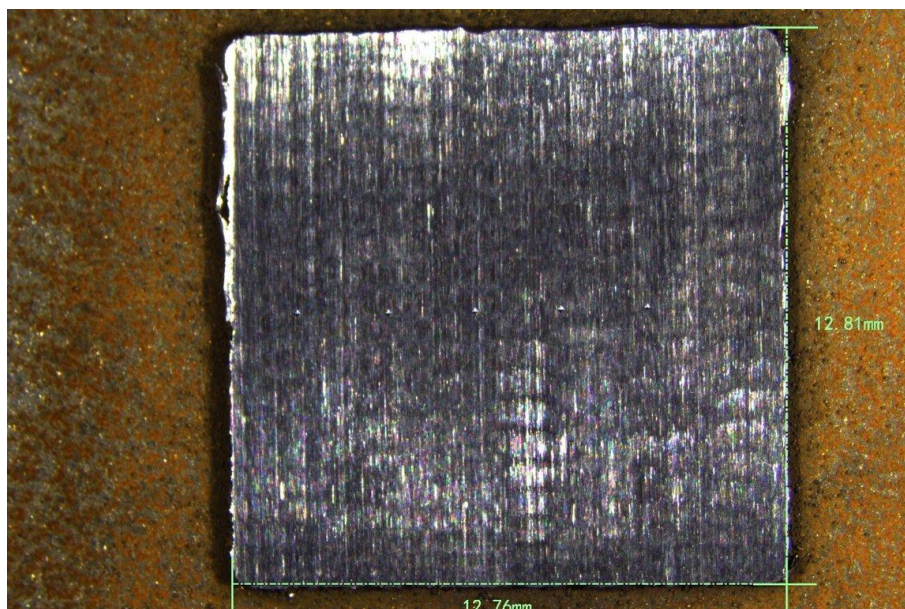


Figura 8. Proba M4 după rectificare – suprafață compactă, fără fisuri vizibile

Proba M5 – variantă exploratorie cu formare in situ de TiC ($\approx 30,8\%$ WC, $\approx 9\%$ Ti). Depunerea ($12,74 \times 12,78$ mm) prezintă benzi longitudinale marcate, cu ondulații de solidificare evidente, iar în zona centrală există fisuri fine, sinuoase, discontinue, cu orientare neregulată și densitate moderată. Marginile sunt cele mai afectate dintre probele M1–M6: latura stângă este neregulată, cu un fragment lamelar parțial desprins în zona colțului inferior, iar pe latura dreaptă există o creștătură locală. Aceste defecte indică o decoeziune locală la margini, unde tensiunile reziduale sunt maxime, și sunt coerente cu efectul adaosului de Ti-6Al-4V, care formează compuși fragili și tinde să segege.

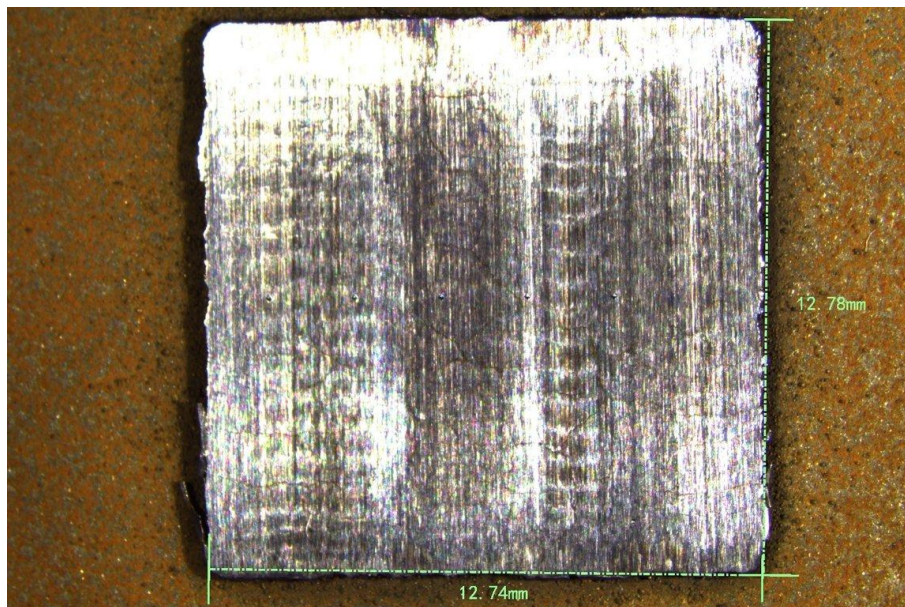


Figura 9. Proba M5 după rectificare – fisuri fine și defecte de margine

Proba M6 – sistem complex ($\approx 30,8\%$ WC, $\approx 4,6\%$ Ti). Depunerea ($12,68 \times 12,75$ mm) are margini relativ curate, dar pe suprafață se văd câteva fisuri transversale lungi, perpendiculare pe direcția rândurilor, care traversează mai multe rânduri. Unele au margini galben-brune, cu produse de oxidare și de coroziune reținute în fisură, ceea ce arată că fisurile sunt deschise la suprafață. Pe traseul unei fisuri se află o cavitate angulară de circa 0,3 mm, care poate reprezenta un por, o lipsă locală de topire sau un loc de smulgere. Fisurile transversale sunt produse de tensiunile reziduale de întindere orientate pe direcția rândurilor, generate de contracția longitudinală împiedicată a cordonului la răcire.

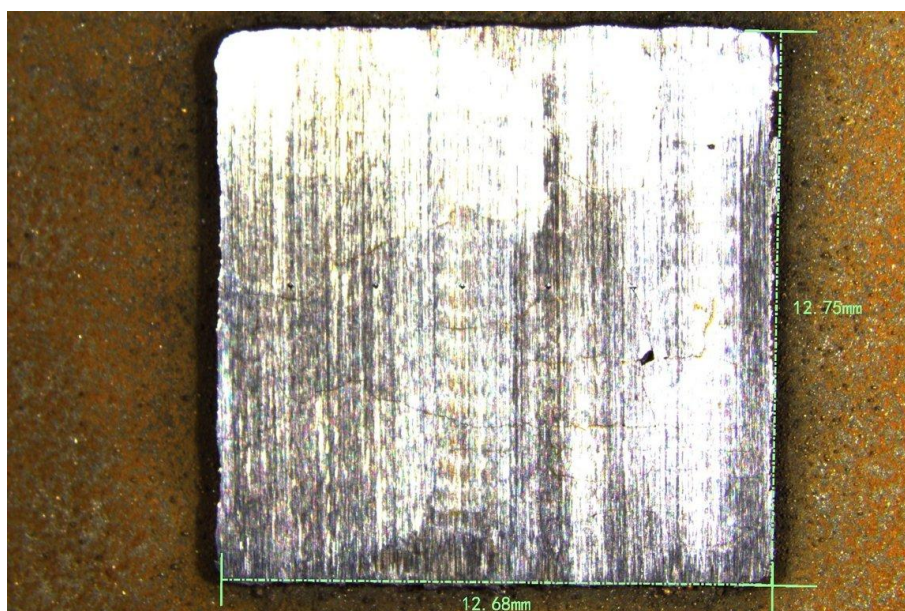


Figura 10. Proba M6 după rectificare – fisuri transversale și cavitate pe traseul unei fisuri

Sinteza observațiilor macroscopice este prezentată în tabelul 5.

Tabelul 5. Sinteza aspectelor macroscopice ale probelor preliminare după rectificare

Proba	WC [% masă]	HV5 medie	Fisuri	Alte discontinuități	Margini	Aprecieri
M0	–	671	rețea poligonală deschisă, cu colorații de oxidare pe pereți	exfoliere extinsă, fragmente desprinse, cavități	contur fragmentat	strat compromis – eliminat
M1	52,8	1045	rețea fină interconectată, celule $\approx 1-2$ mm	micropori numeroși, zone rămase sub planul de rectificare	ușor festonate, ciupiri mici	duritate maximă, fragilitate maximă – selectat
M2	44,0	985	rețea fină extinsă pe toată suprafața, celule $\approx 1-3$ mm	micropori rari	curate, ușor ondulate	duritate foarte ridicată, fază dură uniformă – selectat
M3	35,2	691	câteva fisuri lungi, longitudinale, cu deschidere vizibilă	ondulații de solidificare vizibile	curate	duritate intermediară, matrice tratabilă – selectat
M4	26,4	488	nu se observă	–	crestătură locală pe o latură	integritate bună, duritate insuficientă – referință
M5	30,8	586	fisuri fine, discontinue, orientare neregulată	ondulații de solidificare	fragment lamelar desprins, crestătură	integritate redusă – neselectat
M6	30,8	530	fisuri transversale lungi, cu margini oxidate	cavitate $\approx 0,3$ mm pe traseul unei fisuri, por izolat	relativ curate	fragilitate fără câștig de duritate – neselectat

Interpretarea rezultatelor și selecția amestecurilor

Examinarea a evidențiat cinci tipuri distincte de comportare la fisurare, fiecare asociat unui mecanism specific: rețea poligonală deschisă, oxidată, însoțită de exfoliere (M0) – fisurare la temperatură ridicată și decoeziune într-un material fragilizat de compuși intermetalici; rețea fină, interconectată, fără orientare preferențială (M1, M2) – fisurare la rece a compozitelor cu fracție mare de carburi, al căror schelet dur cvasi-

continuu nu poate acomoda contracția termică; fisuri longitudinale lungi, cu deschidere vizibilă (M3) – localizarea deformației în zonele de suprapunere dintre rânduri, într-o matrice mai tenace; fisuri transversale lungi (M6) și fisuri fine discontinue asociate cu defecte de margine (M5) – tensiuni reziduale longitudinale de întindere, într-un material fragilizat suplimentar prin adaosul de titan; absența fisurilor vizibile (M4) – fracție redusă de carburi și matrice maraging dominantă, capabilă să relaxeze tensiunile prin deformare plastică.

Conținutul de WC este principalul factor care controlează microdurețea. Pentru amestecurile fără titan (M1–M4), variația poate fi aproximată liniar prin relația $HV5 \approx 22,3 \cdot WC - 81$ (WC în % masă), cu coeficientul de corelație $r = 0,97$, relație orientativă stabilită pe patru puncte. Forma reală a dependenței este însă neliniară: la reduceri egale ale conținutului de WC, microdurețea scade cu 60 HV5 de la M1 la M2, cu 294 HV5 de la M2 la M3 și cu 203 HV5 de la M3 la M4. Peste circa 44% WC se atinge un palier de circa 1000 HV5, la care carburile primare și secundare formează un schelet dur cvasi-continuu ce preia sarcina de indentare; sub acest prag, duritatea este controlată predominant de matrice. Consecința inginerescă este că proba M2 atinge circa 94% din microdurețea probei M1, cu un conținut de WC mai mic cu circa 17% relativ și cu o componentă maraging de 15%.

În sistemele fără titan, morfologia fisurării evoluează sistematic cu conținutul de WC: la $\geq 44\%$ WC apare o rețea fină generalizată, la 35,2% WC apar câteva fisuri lungi localizate, iar la 26,4% WC nu se observă fisuri. În condițiile de depunere adoptate, pragul de fisurare în stare brută se situează preliminar între 26,4% și 30,8% WC. Probele cu titan fisurează la durități mai mici decât M3, ceea ce arată că titanul crește fragilitatea independent de duritate, în concordanță cu comportarea extremă a probei M0. Rezultă că microdurețea singură nu descrie fragilitatea straturilor și că pentru selecție și optimizare sunt necesari indicatori specifici.

Comportarea metalurgică a sistemelor M1–M6 se explică prin interacțiunea dintre constituenți. În baia laser, liantul de cobalt al carburii se topește și eliberează granulele de WC, care se dizolvă parțial în topitura bogată în Co, Cr și Fe; la solidificare se formează carburi secundare și carburi η de tip M6C, care cresc duritatea, dar reduc tenacitatea. Matricea de tip Stellite 6 solidifică sub formă de dendrite de soluție solidă de cobalt cu carburi de crom interdendritice, iar identitatea bazei metalurgice dintre matrice și liantul carburii asigură umectarea foarte bună a particulelor de WC, ceea ce explică integritatea probelor M1–M6 în contrast cu M0. Componenta maraging are, în stare brută de depunere, o duritate moderată, dar oferă o cale suplimentară de durificare prin îmbătrânire; carbonul provenit din dizolvarea WC are însă un efect defavorabil, deoarece leagă titanul și molibdenul sub formă de carburi și favorizează menținerea austenitei reziduale. În cazul amestecurilor cu titan, formarea TiC consumă carbonul eliberat prin dizolvarea WC, reducând proporția carburilor secundare bogate în wolfram.

Pe baza microdurității și a examinării macroscopice au fost selectate pentru etapele următoare amestecurile **M1, M2 și M3**. Cele trei amestecuri au cele mai mari microdurități (691–1045 HV5), de 3,5–7 ori peste duritatea substratului, și acoperă un domeniu larg al raportului carbură/matrice (35–53% WC), util pentru optimizare; straturile sunt continue și aderente după rectificare, iar discontinuitățile observate sunt tipice straturilor dure compozite în stare brută de depunere și constituie ținta directă a etapelor următoare. Amestecurile M2 și M3 conțin componentă maraging, care oferă o cale suplimentară de durificare și de creștere a tenacității matricei prin tratament termic. Amestecul M4 este păstrat ca referință pentru starea fără fisuri, fiind cel mai integru, dar cu duritate insuficientă. Amestecurile M5 și M6 prezintă fragilitate indusă

de titan fără câștig de duritate și nu au fost selectate, iar amestecul M0, incompatibil metalurgic, a fost eliminat.

Programul experimental privind tratamentul termic al straturilor depuse

Pe baza rezultatelor obținute pe cele șapte depuneri preliminare a fost conceput și implementat programul experimental privind tratamentul termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser. Programul stabilește probele de referință, mecanismele metalurgice asupra cărora poate acționa tratamentul, indicatorii măsurabili de evaluare și măsurile tehnologice complementare care trebuie aplicate la depunere pentru ca efectul tratamentului să fie valorificat.

Tratamentul termic laser post-depunere poate acționa asupra mai multor cauze ale fragilității observate: relaxarea tensiunilor reziduale, care reduce forța motrice pentru propagarea fisurilor existente și pentru apariția de fisuri noi în exploatare; revenirea martensitei și reducerea austenitei reziduale din matrice; îmbătrânirea componentei maraging din amestecurile M2 și M3, cu precipitarea compușilor intermetalici și creșterea durității și tenacității matricei; reducerea neomogenităților microstructurale dintre axele rândurilor și zonele de suprapunere, în limitele permise de durata scurtă a ciclului termic. Oțelul MAR-60HRC are o rezistență mai mare la reversia austenitei decât 18Ni300, ceea ce permite temperaturi de îmbătrânire mai ridicate, compatibile cu ciclurile termice scurte ale tratamentului laser.

Un tratament termic în stare solidă nu poate însă închide fisurile macroscopice deja formate, iar retopirea superficială cu laser, deși poate închide fisurile pe adâncimea retopită, modifică gradul de dizolvare a carburilor și poate genera fisuri noi dacă regimul termic nu este controlat. Din acest motiv, programul experimental prevede combinarea tratamentului termic cu măsuri preventive aplicate chiar la depunere:

- preîncălzirea substratului și controlul temperaturii între treceri, pentru reducerea gradientului termic și a vitezei de răcire;
- post-încălzirea laser in situ, imediat după depunere, pentru încetinirea răcirii în domeniul de temperaturi în care materialul este fragil;
- adaptarea strategiei de scanare – lungimea rândurilor, alternarea direcției, pasul dintre rânduri – pentru reducerea tensiunilor longitudinale care produc fisuri transversale și a defectelor din zonele de suprapunere;
- utilizarea unui strat intermediar fără carburi, care asigură o tranziție graduală a proprietăților și a coeficientului de dilatare între substrat și stratul compozit și limitează diluția;
- optimizarea energiei liniare, pentru limitarea dizolvării carburii de wolfram și a formării carburilor secundare fragile;
- opțional, înlocuirea pulberii concepute pentru pulverizare termică cu o carbură de wolfram adecvată topirii laser, cu dizolvare și porozitate mai reduse.

Eficiența măsurilor tehnologice și a tratamentelor termice urmează să fie cuantificată prin indicatori măsurabili, care constituie variabilele de răspuns ale programului experimental: microduritatea HV5, ca valoare medie și dispersie, pe suprafață, împreună cu profilul de microduritate pe grosimea stratului; densitatea de fisuri, exprimată ca lungime totală a fisurilor raportată la suprafața examinată, determinată prin examinare cu lichide penetrante conform SR EN ISO 3452-1 și analiză de imagine; tenacitatea la rupere prin indentare, determinată prin măsurarea fisurilor radiale care pornesc din colțurile amprentelor Vickers

pe secțiuni lustruite; adâncimea fisurilor și pătrunderea lor până la interfață, determinate pe secțiuni transversale; porozitatea și integritatea marginilor. Pentru comparabilitatea rezultatelor înainte și după tratament, examinarea macroscopică se realizează în condiții identice: aceeași mărire, aceeași iluminare, aceeași poziționare a probei și aceeași zonă de referință.

Criteriul de acceptare a fisurării depinde de aplicație: în practica încărcărilor dure destinate uzurii abrazive, o rețea de fisuri fine de relaxare este frecvent acceptată, în timp ce aceeași rețea nu este admisibilă la solicitări prin impact, la oboseală sau în medii corosive, unde fisurile devin amorse de rupere sau căi de acces spre substrat. Nivelul admisibil de fisurare va fi stabilit, în etapele următoare, în raport cu condițiile de exploatare vizate.

În cadrul fazei au fost elaborate două lucrări științifice, care valorifică rezultatele privind proiectarea și realizarea amestecurilor de pulberi pentru depuneri dure, comportarea acestora la depunerea cu fascicul laser și evaluarea straturilor obținute. Lucrările urmează a fi publicate în Buletinul Institutului de Sudură și Încercări de Materiale (BID ISIM).

Diseminare științifică

Lucrarea 1: *"Processability and Macrostructural Assessment of Multicomponent Hard Coatings Produced by Laser Directed Energy Deposition,,* - Evaluarea procesabilității și a macrostructurii acoperirilor dure multicomponente realizate prin depunere de energie direcționată cu laser (DED).

Această lucrare investighează procesabilitatea și caracteristicile macrostructurale ale acoperirilor dure multicomponente realizate prin depunere de energie direcționată cu laser (DED-LB). Mai multe amestecuri preomogenizate de pulberi metalice au fost depuse în condiții controlate de proces, utilizând un sistem industrial DED-LB. Studiul se concentrează asupra relației dintre caracteristicile pulberilor, interacțiunea laser-material, alimentarea cu pulbere, strategia de depunere și calitatea rezultată a acoperirilor.

Probele depuse au fost examinate atât în stare brut depusă, cât și după rectificarea suprafeței. O atenție deosebită a fost acordată continuității acoperirii, uniformității geometrice, morfologiei suprafeței, aderenței la substrat și prezenței defectelor macroscopice. Amestecurile investigate au prezentat o procesabilitate bună, generând depuneri compacte și aderente. Nu au fost observate delaminări macroscopice critice, porozități deschise semnificative sau fisurări extinse.

Diferențele privind aspectul suprafeței și regiunile influențate termic au fost asociate răspunsului termic distinct al compozițiilor analizate. Rezultatele confirmă adecvarea procedurii DED-LB pentru realizarea acoperirilor dure multicomponente, în condiții tehnologice controlate. Studiul oferă o bază pentru caracterizări ulterioare microstructurale, mecanice și funcționale ale straturilor depuse.

Lucrarea 2: *"Research on the behavior of surface layers formed by powder deposition and laser treatment,,* - Cercetări privind comportarea straturilor de suprafață realizate prin depunere de pulberi și tratament termic cu laser.

Această lucrare prezintă un studiu preliminar privind straturile de suprafață realizate prin imprimare metalică 3D, utilizând tehnologia de depunere de metal cu laser (LMD), din amestecuri de pulberi FeCr îmbogățite cu NiMnSiTi, depuse pe un substrat din oțel aliat. După depunere, stratul a fost omogenizat printr-o prelucrare ulterioară cu fascicul laser (LB), realizată cu ajutorul unui sistem cu fibră Nd:YAG.

Caracterizarea comparativă a fost efectuată imediat după imprimarea 3D și după tratamentul LB, prin microscopie optică și microscopie electronică cu scanare (SEM), la mărimi de $\times 100$, $\times 500$, $\times 1000$ și $\times 2500$. Analiza urmărește evidențierea modificărilor morfologice, a gradului de omogenizare și a eventualelor defecte reziduale din stratul depus, ca bază pentru corelarea ulterioară dintre parametrii de proces LMD/LB și caracteristicile funcționale ale suprafeței.

Rezultatele fazei au fost diseminate prin actualizarea paginii web a ISIM cu raportul tehnic și cu stadiul actual al proiectului.

Rezultatul principal al fazei îl constituie obținerea și testarea unui set de materiale pentru depuneri dure, dintre care trei amestecuri au fost selectate, pe criterii obiective de duritate și integritate, pentru etapele următoare ale proiectului, împreună cu stabilirea parametrilor de proces utilizați și cu programul experimental care fundamentează tratamentul termic post-depunere. Straturile obținute au microdurități de 488–1045 HV5, adică de 2,4–7 ori mai mari decât duritatea substratului, ceea ce confirmă fezabilitatea tehnologică a soluției de durificare prin depunere laser a compozitelor metal–carbură.

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 tintele stabilite și indicatorii asociați pentru monitorizare și evaluare).

Correspondența dintre activitățile planificate și rezultatele obținute în cadrul Fazei 4 poate fi sintetizată astfel:

Rezultat planificat	Rezultat obținut	Grad de realizare
Cercetări privind realizarea de materiale avansate dure sau extradure	Au fost analizate familiile de materiale și mecanismele de durificare aplicabile depunerilor laser și au fost stabilite compozițiile a șapte amestecuri, acoperind un domeniu larg al raportului carbură/matrice	Realizat integral
Realizarea de materiale pentru depuneri dure din pulberi	Cele șapte amestecuri (M0–M6) au fost preparate prin dozare gravimetrică, în loturi de 10 g, din pulberi metalice și compozite metal–carbură	Realizat integral
Testarea aliajelor/compozitelor prin realizarea de straturi depuse dure cu ajutorul tehnologiilor laser	Au fost executate șapte depuneri pe substrat din oțel S355, în condiții identice de pregătire și de proces, cu parametrii de depunere stabiliți și consemnați, urmate de rectificarea plană a suprafeței	Realizat integral
Evaluarea straturilor obținute	Au fost determinate microduritățile HV5 (cinci amprente pe probă) și a fost efectuată examinarea macroscopică la stereomicroscop, cu identificarea și clasificarea discontinuităților	Realizat integral
Selectarea materialelor pentru etapele următoare	Au fost selectate amestecurile M1, M2 și M3, a fost păstrat M4 ca referință pentru starea fără fisuri și au fost eliminate amestecurile M0, M5 și M6, cu justificarea tehnică a deciziei	Realizat integral
Concepere și implementare program experimental de tratament termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser	Programul a fost conceput și implementat pe cele șapte depuneri preliminare, fiind stabilite mecanismele metalurgice vizate, variabilele de răspuns, măsurile tehnologice complementare și condițiile de comparabilitate a examinărilor	Realizat integral
Elaborare lucrări științifice	Au fost elaborate două lucrări științifice, care urmează a fi publicate în BID ISIM	Realizat integral

Rezultat planificat	Rezultat obținut	Grad de realizare
Diseminare rezultate obținute în cadrul fazei	A fost actualizată pagina web a ISIM cu raportul tehnic și cu stadiul actual al proiectului	Realizat
Elaborare raport de cercetare și raport de activitate al fazei 4	Au fost elaborate raportul de cercetare și raportul de activitate ale fazei	Realizat integral

Pe lângă rezultatele tehnice și experimentale, în cadrul fazei au fost elaborate două lucrări științifice, care valorifică rezultatele privind proiectarea amestecurilor de pulberi pentru depuneri dure, comportarea acestora la depunerea cu fascicul laser și evaluarea straturilor obținute prin măsurători de duritate și examinare microscopică. Lucrările urmează a fi publicate în Buletinul Institutului de Sudură și Încercări de Materiale (BID ISIM), titlurile, colectivele de autori și rezumatele acestora fiind prezentate în raportul de cercetare al fazei.

În raport cu rezultatele asumate, se poate considera că au fost obținute:

- materialele pentru depuneri dure, sub formă de amestecuri de pulberi proiectate și preparate;
- straturile dure depuse prin tehnologii laser pe substrat metalic;
- setul de parametri de proces utilizați la depunere;
- rezultatele măsurătorilor de microduritate și ale examinării macroscopice;
- selecția fundamentată a amestecurilor pentru etapele următoare;
- programul experimental privind tratamentul termic al straturilor depuse;
- cele două lucrări științifice aferente fazei;
- raportul de cercetare și raportul de activitate;
- materialele de promovare și informațiile necesare actualizării paginii web.

Continuarea activităților în etapele următoare ale proiectului

Rezultatele obținute în cadrul Fazei 4 furnizează materialele, parametrii de proces și datele experimentale de intrare necesare continuării programului de cercetare. Prin selectarea amestecurilor M1, M2 și M3 și prin păstrarea amestecului M4 ca referință pentru starea fără fisuri, a fost restrâns domeniul de investigare la variantele cu perspectivă tehnologică, ceea ce permite concentrarea resurselor experimentale asupra caracterizării complexe și a optimizării acestora.

În Faza 5, intitulată „Cercetări privind caracterizarea straturilor depuse dure obținute prin tehnologii laser”, vor fi pregătite probe cu straturi depuse realizate din materialele obținute în faza anterioară, care vor fi caracterizate prin analize structurale și prin încercări mecanice de duritate, la uzură și la coroziune. Caracterizarea va cuprinde examinarea microstructurii straturilor, evaluarea distribuției și a gradului de dizolvare a carburilor, analiza zonei de interfață cu substratul și determinarea profilului de duritate pe grosimea stratului.

Straturile vor fi evaluate și din punctul de vedere al discontinuităților, prin examinare cu lichide penetrante și analiză de imagine, pentru determinarea densității de fisuri, precum și pe secțiuni transversale, pentru stabilirea adâncimii fisurilor și a pătrunderii acestora până la interfață. Aceste examinări vor fi realizate în

condiții identice înainte și după aplicarea tratamentului termic, conform programului experimental conceput în Faza 4, astfel încât efectul tratamentului asupra durității, a dispersiei valorilor măsurate și a nivelului de fisurare să poată fi cuantificat.

Datele experimentale obținute vor fi prelucrate, analizate și evaluate, iar pe baza acestora va fi aleasă depunerea cu cele mai bune performanțe, care va constitui punctul de plecare pentru continuarea proiectului. Criteriile de alegere vor combina duritatea și profilul acesteia pe grosimea stratului, integritatea și densitatea de fisuri, tenacitatea evaluată prin indentare, comportarea la uzură și rezistența la coroziune, precum și reproductibilitatea rezultatelor.

Faza 5 include, de asemenea, elaborarea unei lucrări științifice dedicate rezultatelor privind caracterizarea straturilor depuse, diseminarea rezultatelor prin actualizarea paginii proiectului cu rezumatul fazei și cu alte informații relevante, precum și elaborarea raportului de cercetare și a raportului de activitate ale fazei.

Prin succesiunea acestor etape se asigură continuitatea fluxului de cercetare al proiectului: de la realizarea și testarea materialelor pentru depuneri dure, la caracterizarea complexă a straturilor obținute, selectarea variantei optime, optimizarea parametrilor de depunere și, în final, validarea la nivel de laborator a tehnologiei de depunere.

Rezultatele obținute în cadrul Fazei 4

În raport cu activitățile planificate și cu indicatorii prevăzuți în propunerea de proiect, în cadrul Fazei 4 au fost obținute următoarele rezultate:

R5 – Tehnologii de procesare cu LASER a suprafețelor materialelor investigate

Au fost realizate și testate tehnologiile de procesare cu fascicul laser pentru materialele investigate, prin executarea a șapte depuneri din amestecuri de pulberi cu compoziții diferite, pe substrat din oțel S355. Pentru fiecare configurație de alimentare au fost stabilite masa țintă de pulbere, debitele gazului purtător, ale gazului coaxial și ale gazului de protecție, puterea nominală a fasciculului laser și tabela de corelare dintre înălțimea măsurată a stratului și puterea comandată.

Straturile obținute din amestecurile M1–M6 sunt continue, compacte și aderente, cu grosimi de circa 1 mm și microdurități cuprinse între 488 și 1045 HV5. Au fost identificate și cuantificate abaterile dimensionale sistematice ale depunerilor (0,68–0,81 mm față de conturul programat) și a fost stabilită necesitatea compensării traiectoriei cu circa 0,35–0,40 mm pe fiecare latură, element direct utilizabil în etapele de optimizare a tehnologiei.

R6 – Program experimental în vederea optimizării tehnologiilor

A fost conceput și implementat programul experimental privind tratamentul termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser, pe baza celor șapte depuneri preliminare realizate. Programul stabilește probele de referință, mecanismele metalurgice asupra cărora acționează tratamentul termic post-depunere – relaxarea tensiunilor reziduale, revenirea martensitei, reducerea austenitei reziduale, îmbătrânirea componentei maraging și reducerea neomogenităților structurale – precum și măsurile tehnologice complementare aplicabile la depunere: preîncălzirea substratului și controlul temperaturii între treceri, post-încălzirea laser in situ, adaptarea strategiei de scanare, utilizarea unui strat intermediar fără carburi și optimizarea energiei liniare.

Programul definește totodată variabilele de răspuns măsurabile – microduritatea și dispersia acesteia, profilul de duritate pe grosimea stratului, densitatea de fisuri, tenacitatea la rupere prin indentare, adâncimea fisurilor, porozitatea și integritatea marginilor – precum și condițiile de comparabilitate a examinărilor efectuate înainte și după tratament.

R7 – Rapoarte de analize, încercări și evaluări pentru materialele investigate

Au fost elaborate rezultatele analizelor și evaluărilor pentru materialele investigate, cuprinzând măsurătorile de microduritate HV5 pe cele șapte probe, cu valorile individuale, mediile, abaterile standard și coeficienții de variație, precum și examinarea microscopică detaliată la stereomicroscop, cu măsurarea dimensiunilor depunerilor, identificarea și clasificarea discontinuităților și evaluarea integrității marginilor.

Rezultatele au fost interpretate metalurgic și au permis stabilirea corelațiilor dintre compoziția amestecurilor, nivelul de duritate și comportarea la fisurare, inclusiv identificarea palierului de duritate de circa 1000 HV5 peste 44% WC și a pragului preliminar de fisurare, situat între 26,4% și 30,8% WC.

R9 – Pagina web a proiectului

A fost actualizată pagina web a ISIM cu raportul tehnic al fazei și cu stadiul actual al proiectului, prin prezentarea obiectivului fazei, a activităților desfășurate, a materialelor dezvoltate și a principalelor rezultate obținute. Actualizarea contribuie la menținerea vizibilității proiectului și la informarea comunității științifice, a mediului economic și a publicului interesat cu privire la evoluția cercetărilor.

R10 – Publicații științifice

Au fost elaborate două lucrări științifice aferente fazei, care prezintă proiectarea și prepararea amestecurilor de pulberi destinate depunerilor dure, comportarea acestora la depunerea cu fascicul laser, rezultatele măsurătorilor de duritate și ale examinării macroscopice, precum și corelațiile stabilite între compoziție, duritate și integritatea straturilor. Lucrările au fost pregătite pentru publicare în BID ISIM.

R13 – Materiale și activități de promovare a proiectului și a rezultatelor obținute

Au fost pregătite materiale pentru promovarea rezultatelor Fazei 4, care prezintă materialele dezvoltate pentru depuneri dure, nivelul de duritate obținut și avantajele soluției de durificare prin depunere laser a compozitelor metal–carbură. Materialele pot fi utilizate în cadrul paginii web, al postărilor pe rețelele sociale, al manifestărilor tehnico-științifice și al altor activități de diseminare.

R14 – Raport de cercetare și raport de activitate al fazei

A fost elaborat raportul de cercetare al Fazei 4, în care sunt prezentate în detaliu fundamentarea alegerii materialelor, compoziția amestecurilor, parametrii de proces utilizați, execuția depunerilor, rezultatele măsurătorilor de microduritate, examinarea microscopică a probelor, interpretarea metalurgică a rezultatelor, selecția amestecurilor pentru etapele următoare și programul experimental privind tratamentul termic. Totodată, a fost elaborat raportul de activitate al fazei, care sintetizează obiectivele, activitățile desfășurate, rezultatele preconizate și efectiv obținute, gradul de realizare și contribuția fazei la continuarea proiectului.

Sinteza rezultatelor fazei

Cod rezultat	Rezultat obținut	Grad de realizare
R5	Tehnologii de procesare cu laser a suprafețelor pentru materialele investigate, cu parametrii de proces stabiliți	Realizat
R6	Program experimental privind tratamentul termic al straturilor dure depuse prin tehnologii laser	Realizat
R7	Rezultatele analizelor, încercărilor și evaluărilor pentru materialele investigate	Realizat
R9	Actualizarea paginii web cu raportul tehnic și stadiul actual al proiectului	Realizat
R10	Două lucrări științifice aferente fazei	Realizat
R13	Materiale și activități de promovare a proiectului și a rezultatelor fazei	Realizat
R14	Raport de cercetare și raport de activitate al Fazei 4	Realizat

Prin rezultatele obținute, Faza 4 și-a îndeplinit obiectivul privind realizarea și testarea aliajelor și compozitelor pentru depuneri dure și fundamentarea îmbunătățirii caracteristicilor mecanice și funcționale ale acestora prin tratamente termice. Materialele selectate, parametrii de proces stabiliți și programul experimental conceput asigură baza tehnică și metodologică necesară continuării cercetărilor privind caracterizarea straturilor depuse dure obținute prin tehnologii laser.

Mulțumiri

- activitățile au fost elaborate în cadrul proiectului PN 23 37 01 04 „Dezvoltarea de materiale și tehnologii de fabricație avansate pentru ingineria suprafețelor. Realizarea de suprafețe extradure prin procesare cu fascicule concentrate”, finanțat de Ministerul Educației și Cercetării din România, Autoritatea Națională pentru Cercetare, în cadrul Programului NUCLEU de cercetare-dezvoltare al ISIM Timișoara, contract nr. 16N/2023, PN ISIM 2023–2026.
- pentru realizarea cercetărilor experimentale au fost utilizate echipamentele performante achiziționate prin proiectul INFRATECH „Infrastructure for excellence research in welding” (SMIS 2014+ 126084), finanțat de Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării prin Programul Operațional Competitivitate 2014–2020.

Responsabil proiect

Drd. ing. PERIANU Ion-Aurel