

Raport activitate/Rezumat PN 23 37 01 04 - faza 5**Cercetări privind caracterizarea straturilor depuse dure obținute prin tehnologii laser****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 5, obiectivul proiectului este urmărit prin trecerea de la realizarea și testarea materialelor pentru depuneri dure la caracterizarea complexă a straturilor obținute din aceste materiale. Activitățile fazei au vizat pregătirea probelor cu straturi depuse, caracterizarea structurală prin microscopie optică și microscopie electronică cu baleiaj, analiza chimică prin spectrometrie de raze X cu dispersie după energie, determinarea durității înainte și după tratamentul cu fascicul laser, evaluarea comportării funcționale prin încercări de uzură abrazivă, precum și prelucrarea și interpretarea datelor experimentale în vederea selectării depunerii cu cele mai bune performanțe.

Prin aceste activități se încheie a doua verigă a corelației urmărite la nivelul întregului proiect: compoziția amestecului de pulberi – parametrii procesului de depunere și de tratament cu fascicul laser – microstructura și compoziția chimică a stratului – duritatea și comportarea la uzură a stratului depus. Rezultatele obținute transformă observațiile calitative din etapa anterioară în indicatori măsurabili de performanță și constituie baza obiectivă pentru optimizarea parametrilor de depunere, urmărită în etapa următoare a 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, inclusiv condițiile tratamentului cu fascicul laser aplicat după depunere.

Un rezultat distinct îl reprezintă **programul experimental în vederea optimizării tehnologiilor**, prin care sunt stabilite variabilele de proces, 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 măsurărilor de duritate, ale examinărilor macroscopice și microstructurale, ale analizelor chimice, 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 adevize, 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 5 sunt:

- probe cu straturi depuse, realizate din materialele obținute în faza anterioară;
- rezultatele analizelor structurale ale straturilor depuse;
- rezultatele încercărilor mecanice de duritate și ale încercărilor de uzură;
- programul experimental preșiminar în vederea optimizării procesării cu fascicul laser;
- selecția depunerii cu cele mai bune performanțe;
- o lucrare științifică;

3. Obiectivul fazei:

Obiectivul Fazei 5 a constat în caracterizarea complexă a straturilor dure depuse prin tehnologii laser, realizate din materialele selectate în faza anterioară, prin analize structurale și prin încercări mecanice de duritate și de uzură, precum și în prelucrarea și evaluarea datelor experimentale în vederea alegerii depunerii cu cele mai bune performanțe.

În cadrul fazei s-a urmărit, în primul rând, stabilirea efectului real al tratamentului cu fascicul laser aplicat după depunere asupra stării stratului. Programul experimental conceput în faza anterioară a indicat retopirea superficială cu fascicul laser ca principala cale de acțiune asupra neomogenităților structurale, a

rugozității de urmă și a porozității deschise a straturilor depuse prin procedee cu pulbere suflată. Verificarea acestei ipoteze a impus realizarea unui set de probe tratate și a unei probe martor, examinate în condiții identice înainte și după tratament, astfel încât modificările observate să poată fi atribuite tratamentului, nu variației de poziție pe cordon sau diferențelor între șarje.

Un al doilea obiectiv tehnic l-a constituit caracterizarea structurală și chimică a straturilor, prin examinare macroscopică la stereomicroscop, prin microscopie electronică cu baleiaj la mărimi succesive și prin analiză chimică semicantitativă cu dispersie după energie. S-a urmărit identificarea morfologiei suprafeței în stare brut depusă, a discontinuităților specifice procedeului, a modificărilor produse de retopire și a eventualelor reacții de suprafață care însoțesc tratamentul.

Al treilea obiectiv tehnic a vizat evaluarea funcțională a straturilor prin încercări de uzură abrazivă. Pentru aceasta au fost realizate probe cu geometrie inelară, pe care depunerea a fost executată circular, pe un substrat comun, în condiții identice de proces, din amestecurile selectate în faza anterioară și din amestecul de referință eliminat. Compararea celor trei materiale pe aceeași geometrie, cu aceeași sarcină și cu același program de cicluri, permite măsurarea directă a câștigului de rezistență la uzură adus de fracția de carburi, independent de valorile de duritate măsurate anterior.

Faza a urmărit, de asemenea, fundamentarea etapei de optimizare a procesării cu fascicul laser. În acest scop au fost analizați parametrii de proces ai tratamentului, au fost separați parametri menținuți constanți de cei care pot fi variați independent și au fost stabiliți factorii, nivelurile și structura unui plan factorial complet de tip 2^3 cu puncte centrale, împreună cu piesa de lucru pe care acesta urmează a fi implementat.

Pe baza rezultatelor obținute, obiectivul fazei a inclus prelucrarea și analizarea datelor experimentale și alegerea, pe criterii obiective, a depunerii cu cele mai bune performanțe, care va constitui punctul de plecare pentru optimizarea parametrilor de depunere în etapa următoare.

Faza a inclus și obiective de natură științifică și documentară: elaborarea unei lucrări științifice dedicate comportării la uzură a straturilor dure multicomponente, 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.

4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Pentru atingerea obiectivului Fazei 5 au fost preconizate rezultate experimentale, analitice, documentare și de diseminare, corelate cu caracterizarea straturilor depuse și cu fundamentarea etapei de optimizare a parametrilor de depunere.

Primul rezultat preconizat l-a constituit **pregătirea probelor cu straturi depuse**, respectiv realizarea și pregătirea metalografică a probelor destinate examinărilor structurale și măsurărilor de duritate, precum și realizarea probelor cu geometrie inelară destinate încercărilor de uzură.

Un al doilea rezultat preconizat a fost **caracterizarea structurală a straturilor depuse**, prin examinare macroscopică a suprafeței și a secțiunii, prin microscopie electronică cu baleiaj la mărimi succesive și prin analiză chimică semicantitativă SEM–EDX, efectuate în condiții identice înainte și după tratamentul cu fascicul laser.

A fost preconizată **determinarea durității straturilor** pe o grilă spațială identică pentru toate probele, în stare brut depusă și după tratament, împreună cu evaluarea atât a valorii medii, cât și a dispersiei rezultatelor, ca indicator al gradului de omogenizare a stratului.

Un rezultat esențial preconizat l-au constituit **rezultatele încercărilor de uzură**, obținute pe probe realizate din amestecurile selectate în faza anterioară și din amestecul de referință, în condiții identice de sarcină, de turație și de program de cicluri, cu determinarea pierderii de masă, a ratei de uzură și a indicelui de uzură.

A fost preconizată stabilirea **programului experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser**, cuprinzând separarea parametrilor constanți de cei variabili, motivarea fizică a factorilor reținuți, nivelurile de variație, structura planului factorial 2^3 cu puncte centrale și geometria piesei de lucru pe care acesta se implementează.

Pe această bază a fost preconizată **selecția depunerii cu cele mai bune performanțe**, cu justificarea tehnică a alegerii pe baza combinată a durității, a integrității stratului și a comportării la uzură.

Au fost preconizate, de asemenea, rezultate științifice și de diseminare: elaborarea unei lucrări științifice, actualizarea paginii proiectului cu rezumatul fazei și cu alte informații relevante, elaborarea materialelor de promovare și întocmirea raportului de cercetare și a raportului de activitate ale fazei.

Sintetic, rezultatele preconizate pentru Faza 5 au fost:

- probe cu straturi depuse, pregătite pentru examinări structurale, pentru măsurători de duritate și pentru încercări de uzură;
- rezultatele examinărilor macroscopice, ale microscopiei electronice cu baleiaj și ale analizei chimice SEM-EDX;
- rezultatele măsurătorilor de duritate înainte și după tratamentul cu fascicul laser;
- rezultatele încercărilor de uzură abrazivă pentru cele trei materiale comparate;
- programul experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser, cu planul factorial 2^3 și piesa de lucru asociată;
- selecția fundamentată a depunerii cu cele mai bune performanțe;
- o lucrare științifică;
- actualizarea paginii proiectului cu rezumatul fazei;
- materiale de promovare;
- raportul de cercetare și raportul de activitate ale fazei.

5. Rezumatul fazei:

Faza 5, intitulată „Cercetări privind caracterizarea straturilor depuse dure obținute prin tehnologii laser”, a avut ca obiectiv principal caracterizarea complexă a straturilor realizate din materialele dezvoltate în faza anterioară, prin analize structurale, prin măsurători de duritate și prin încercări de uzură, precum și prelucrarea datelor experimentale în vederea alegerii depunerii cu cele mai bune performanțe.

Activitățile fazei s-au desfășurat pe două direcții complementare. Prima direcție a urmărit efectul tratamentului cu fascicul laser aplicat după depunere asupra stării stratului: morfologia suprafeței și a secțiunii, compoziția chimică a suprafeței libere și duritatea, măsurate în condiții identice înainte și după

tratament. A doua direcție a urmărit comportarea funcțională a materialelor selectate în faza anterioară, evaluată prin încercări de uzură abrazivă efectuate pe probe cu geometrie inelară, realizate în condiții identice de proces. Pe baza rezultatelor celor două direcții a fost fundamentat programul experimental de optimizare a procesării cu fascicul laser și a fost selectată depunerea cu cele mai bune performanțe.

Probele analizate și fluxul experimental al fazei

Caracterizarea a fost efectuată pe două seturi de probe, cu roluri distincte și complementare, prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1. Seturile de probe analizate în cadrul Fazei 5

Set de probe	Material și stare	Tratament aplicat	Examinări efectuate
P1–P4	strat depus prin LMD pe substrat din oțel aliat, stare brut depusă	retopire cu fascicul laser, o singură trecere, fără aport de pulbere	macroscopie optică de suprafață și de secțiune, SEM, SEM–EDX, duritate HV10 înainte și după tratament
P5	idem, martor	fără tratament	aceleași examinări, ca stare de referință a stratului brut depus
Disc inelar M0	depunere inelară din amestecul de referință M0, un singur strat depus	fără tratament	încercare de uzură abrazivă pe platformă rotativă
Disc inelar M1	depunere inelară din amestecul M1, un singur strat depus	fără tratament	încercare de uzură abrazivă pe platformă rotativă
Disc inelar M2	depunere inelară din amestecul M2, un singur strat depus	fără tratament	încercare de uzură abrazivă pe platformă rotativă
Disc inelar – matricea experimentală 2	depunere inelară, două straturi depuse	tratament cu fascicul laser aplicat pe sectoare distincte	verificarea integrității piesei după tratament, în vederea implementării planului factorial

Setul P1–P5 cuprinde cinci cupoane prismatice debitate din aceeași familie de depuneri, realizate prin depunere laser cu pulbere suflată (LMD) pe substrat din oțel aliat, dintr-un amestec de pulberi prealabil omogenizat, pe bază de fier și crom, cu adaosuri de nichel, mangan, siliciu și titan.

Discurile inelare provin din amestecurile M0, M1 și M2 preparate și caracterizate în faza anterioară, respectiv amestecul de referință exclusiv metalic și cele două amestecuri metal–carbura cu cel mai ridicat conținut de carbura de wolfram. Alegerea acestor trei materiale permite acoperirea întregului domeniu util al raportului carbura/matrice și compararea directă a sistemului fără carburi cu sistemele compozite.

Fiecare material a fost depus pe două discuri identice: unul cu un singur strat, destinat încercărilor de uzură, și unul cu două straturi, destinat tratamentului cu fascicul laser și examinărilor asociate. Utilizarea aceleiași geometrii de piesă pentru ambele categorii de determinări simplifică pregătirea probelor și asigură condiții de depunere identice pentru materialele comparate.

Probele P1–P5 au fost lustruite pe fața de măsurare și marcate cu indicativele «s», «c» și «d», corespunzătoare pozițiilor stânga, centru și dreapta pe lățimea cordonului depus. Grila spațială nu are rol de convenție: examinarea microscopică a probei martor arată că zona din dreapta cordonului concentrează particulele incomplet topite și lipsurile locale de fuziune, iar duritatea măsurată confirmă acest lucru. O valoare medie unică ar fi mascat tocmai neomogenitatea asupra căreia trebuie să acționeze tratamentul. Pregătirea metalografică s-a efectuat pe mașina automată de șlefuit și lustruit din dotarea ISIM, prin

sucesiunea hârtiilor abrazive din carbură de siliciu de la granulația 120 la 1200, urmată de lustruire cu suspensie de diamant de 3 μm și 1 μm , cu curățare intermediară. Capul de presare programabil asigură forță și timp reproductibile de la o probă la alta, condiție necesară pentru ca valorile măsurate pe grila s-c-d să fie comparabile.

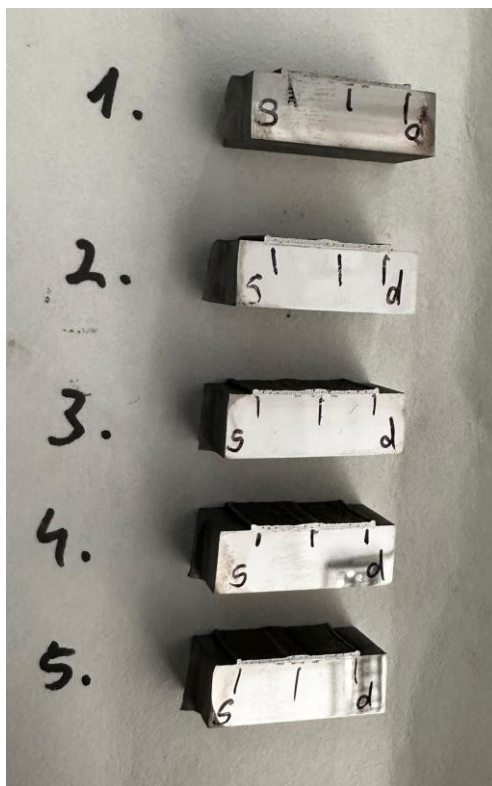


Figura 1. Probele P1–P5 după pregătirea pentru indentare, marcate stânga (s), centru (c) și dreapta (d). Proba 5 rămâne martorul în stare brut depusă.

Caracterizarea a utilizat trei posturi de lucru din dotarea ISIM: mașina automată de șlefuit și lustruit, pentru pregătirea metalografică; durimetrul Vickers și stereomicroscopul cu achiziție digitală, pentru măsurătorile de duritate și examinarea optică; microscopul electronic cu baleiaj cu modul de analiză EDX, pentru morfologie și compoziție chimică semicantitativă. Tratamentul cu fascicul laser s-a efectuat separat, pe celula robotizată de procesare cu laser, echipată cu sursă cu fibră și cap optic montat pe braț robotizat, cu sistem de focalizare prin imagine digitală iluminată în ultraviolet. Încercările de uzură s-au efectuat pe aparatul de uzură abrazivă cu platformă rotativă din dotarea institutului.

Caracterizarea structurală a straturilor depuse și retopite cu fascicul laser

Morfologia stratului în stare brut depusă reproduce semnătura caracteristică a depunerii cu pulbere suflată: cordoane paralele, ondulație la scara urmei, particule parțial topite rămase aderente la suprafață și pori la joncțiunile dintre treceri succesive. Examinarea macroscopică a suprafeței, la un câmp de 10 mm, arată urmele de depunere clar rezolvate, ușor oxidate, cu reziduuri locale de pulbere incomplet consolidată. După retopire, ferestrele tratate devin netede și sunt bordate de culori de revenire auriu-albăstrui, care marchează extinderea zonei influențate termic.

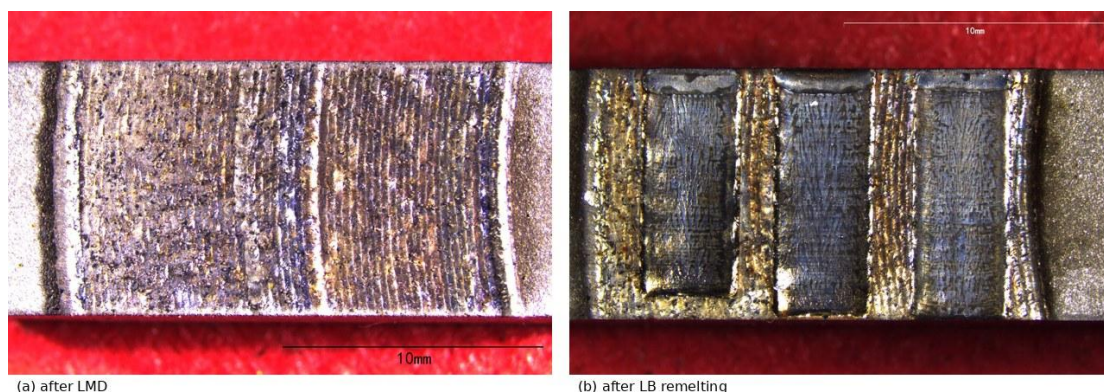


Figura 2. Macrografii optice ale probei P1: a) după depunerea LMD; b) după retopirea cu fascicul laser. Scara 10 mm.

Examinarea secțiunii confirmă modificarea de topologie a stratului. În stare brut depusă, stratul este o depunere multias, cu suprafață ondulantă și legătură metalurgică cu substratul, iar la joncțiunile dintre treceri apar buzunare locale de lipsă de topire. După retopire, regiunea de lângă suprafață devine o zonă retopită continuă. Nu este vorba despre o retopire a întregii grosimi, ci despre o crustă de ordinul zecilor până la sutelor de micrometri, geometrie așteptată pentru o singură trecere fără aport de pulbere și cu aport energetic moderat.

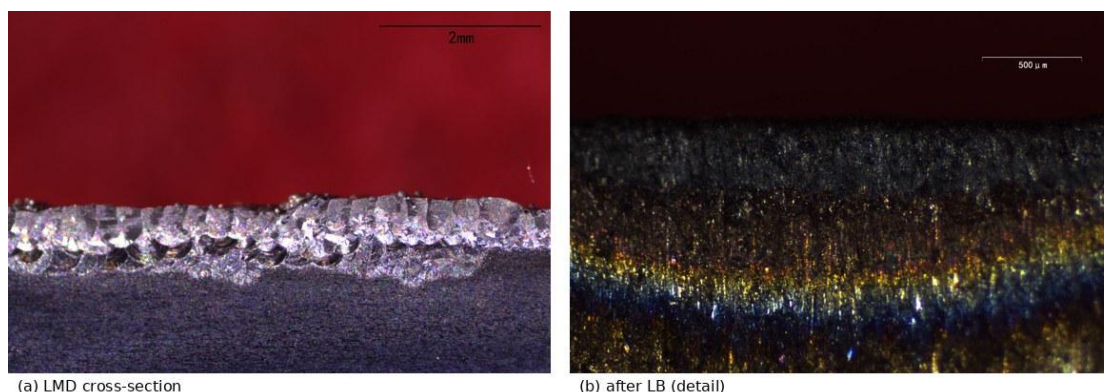


Figura 3. Secțiuni optice prin strat: a) strat în stare brut depusă (scara 2 mm); b) detaliu lângă suprafață, după retopirea cu fascicul laser (scara 500 μm).

Microscopia electronică cu baleiaj, efectuată pe proba martor la mărimi succesive de $\times 100$, $\times 500$, $\times 1000$ și $\times 2500$, în electroni secundari, detaliază starea suprafeței brut depuse. La $\times 100$ suprafața este neregulată, cu pori și incluziuni. La $\times 500$ și $\times 1000$ se disting particule parțial topite și lipsuri locale de fuziune, iar subsuprafața are caracter direcțional, consistent cu solidificarea rapidă specifică procedurii. La $\times 2500$ suprafața apare ca un agregat slab coalescent. Aceste observații constituie justificarea fizică a tratamentului de retopire: în stare brut depusă, pulberea nu este complet omogenizată în stratul format.

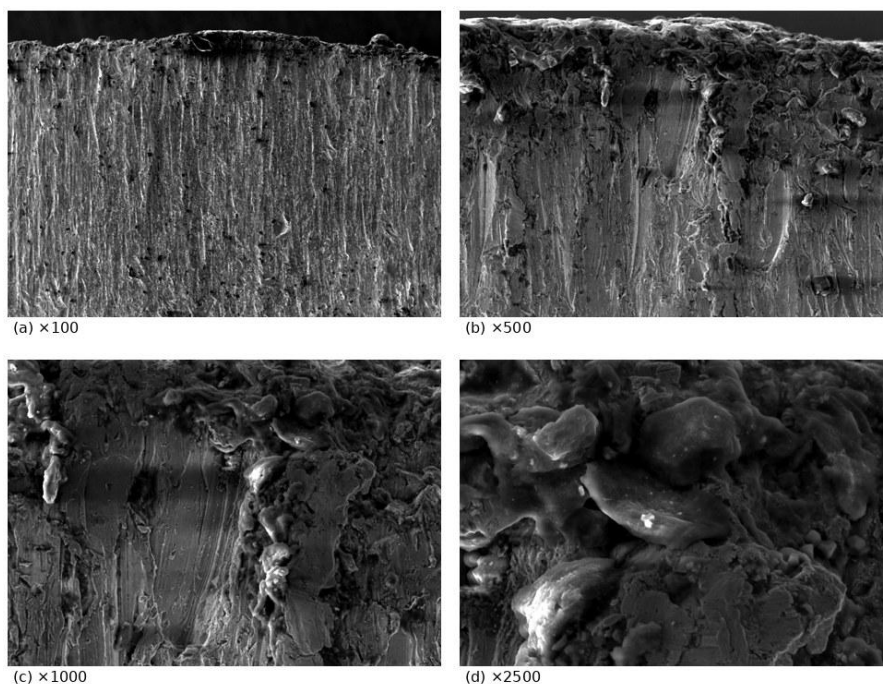


Figura 4. Imagini SEM ale stratului în stare brut depusă, proba martor P5, poziție mediană: a) $\times 100$; b) $\times 500$; c) $\times 1000$; d) $\times 2500$.

După retopire, suprafața examinată la $\times 100$ este convexă și continuă, cu o zonă retopită de câteva zeci de micrometri. La mărimi mai mari, pelicula de suprafață prezintă formațiuni circulare de tip crater. Morfologia este compatibilă cu o baie superficială resolidificată rapid și, citită împreună cu rezultatele analizei chimice, cu prezența unui oxid discontinuu la suprafața liberă. Se poate afirma, prin urmare, că retopirea nivelează geometria stratului, dar introduce totodată un constituent nou în imediata vecinătate a suprafeței.

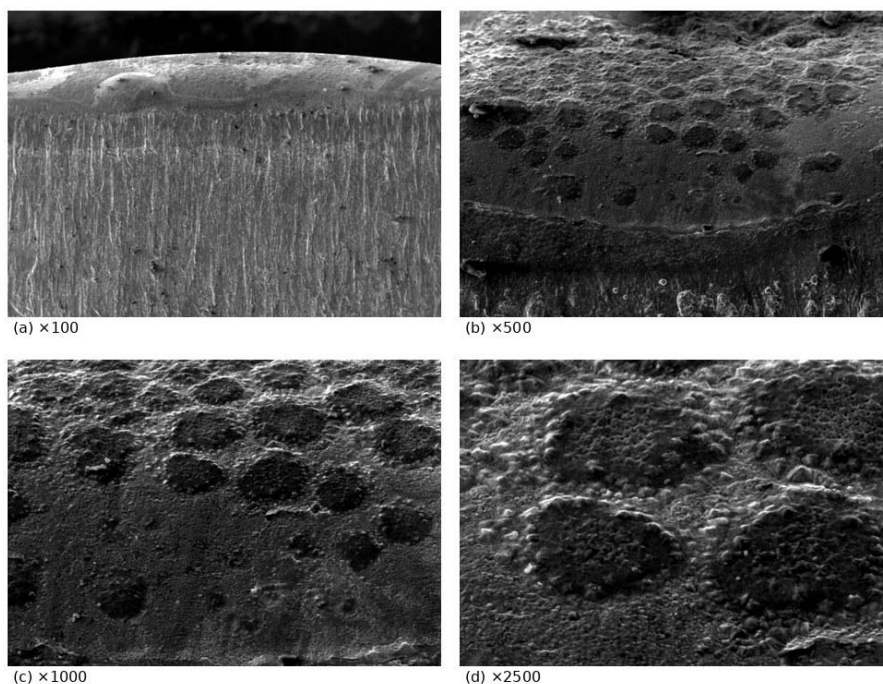


Figura 5. Imagini SEM ale stratului după retopirea cu fascicul laser, proba P1, poziție mediană: a) $\times 100$; b) $\times 500$; c) $\times 1000$; d) $\times 2500$.

Duritatea straturilor înainte și după retopirea cu fascicul laser

Duritatea a fost aleasă ca funcție obiectiv a acestei etape din trei motive. Primul este metalurgic: duritatea Vickers este cel mai rapid indicator al gradului de omogenizare, întrucât un strat cu particule incomplet topite și cu benzi de suprapunere produce o distribuție împrăștiată a valorilor, iar o retopire care omogenizează efectiv trebuie să strângă această împrăștiere, chiar dacă valoarea medie nu crește. Al doilea este de proiect: obiectivul este obținerea unui strat mai performant decât cel brut depus, iar fără măsurători efectuate înainte și după tratament efectul acestuia nu poate fi demonstrat. Al treilea ține de pregătirea etapei de optimizare: aceeași mărime va constitui variabila de răspuns a planului factorial.

Măsurătorile s-au efectuat cu sarcina de 98,07 N (HV10), câte trei indentări în fiecare dintre cele trei poziții ale grilei s-c-d, pe fiecare probă. Sarcina de 10 kgf integrează un volum relevant în raport cu dendritele fine rezultate din solidificarea rapidă, rămânând totodată în grosimea stratului. Duritatea metalului de bază, de 221 HV10, constituie ancora de referință: orice afirmație privind durificarea se judecă în raport cu substratul. Rezultatele sunt prezentate în tabelele 2 și 3 și ilustrate în figurile 6 și 7.

Tabelul 2. Duritatea HV10 a metalului de bază și a stratului în stare brut depusă

Probă	Stânga	Centru	Dreapta	Medie	s
Metal de bază	221 / 221 / 221	221	221	221	0
P1 brut depus	193 / 193 / 193	181 / 181 / 181	151 / 151 / 151	175	19
P2 brut depus	209 / 209 / 209	206 / 206 / 206	160 / 181 / 206	199	17
P3 brut depus	170 / 206 / 206	186 / 186 / 186	160 / 193 / 193	187	15
P4 brut depus	201 / 196 / 196	160 / 227 / 188	193 / 193 / 170	192	19
P5 brut depus (martor)	206 / 206 / 206	179 / 206 / 179	151 / 151 / 151	182	26

Tabelul 3. Duritatea HV10 după retopirea cu fascicul laser

Probă	Stânga	Centru	Dreapta	Medie	s	Δ HV10
P1 după retopire	143 / 143 / 143	160 / 160 / 160	136 / 136 / 136	146	11	-29
P2 după retopire	160 / 160 / 160	170 / 170 / 170	181 / 179 / 160	168	8	-31
P3 după retopire	151 / 151 / 151	157 / 160 / 160	170 / 170 / 170	160	8	-27
P4 după retopire	151 / 160 / 160	160 / 160 / 160	136 / 151 / 151	154	8	-37
P5 (martor)	—	—	—	—	—	netratat

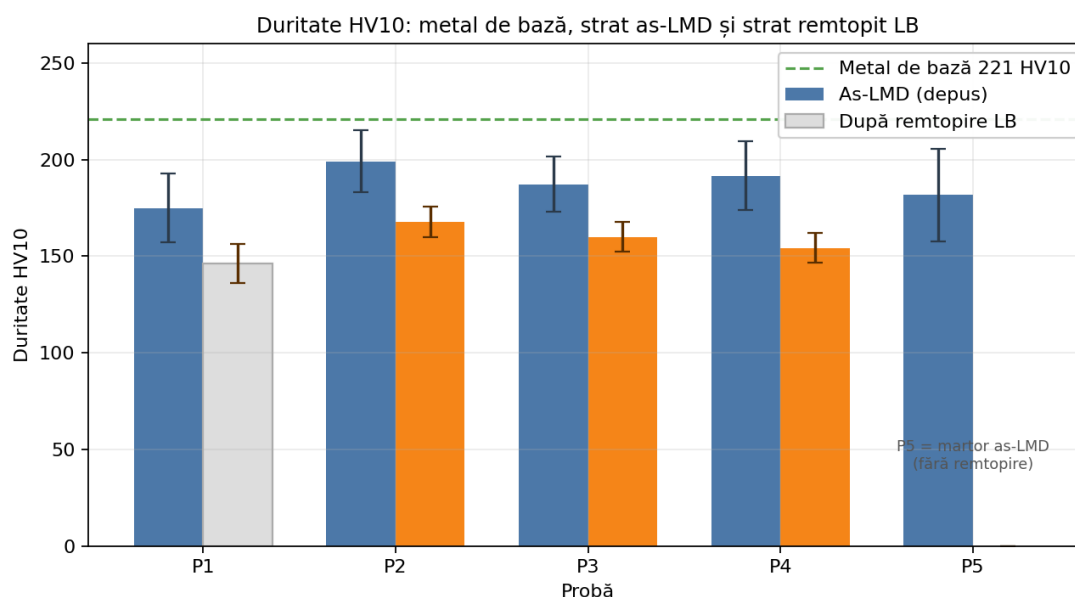


Figura 6. Duritatea HV10 a metalului de bază, a stratului brut depus și a stratului retopit. Proba P5 este martorul netratat.

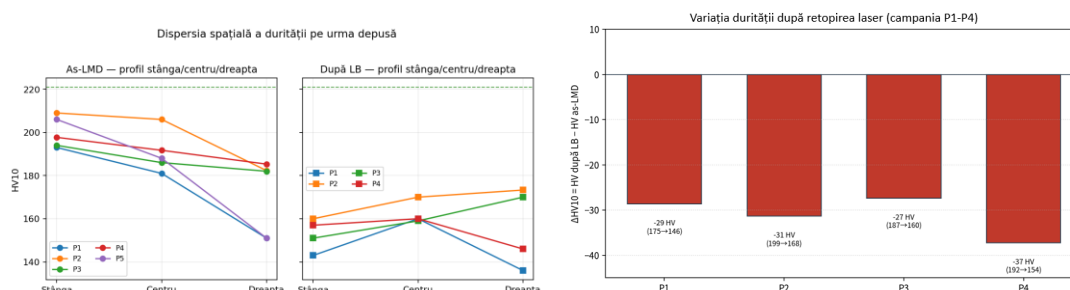


Figura 7. a) Profilul spațial al durității pe grila stânga–centru–dreapta, înainte și după retopire; b) variația durității după retopire pentru cele patru probe tratate.

Stratul în stare brut depusă este sistematic mai moale decât substratul: valorile medii se situează între 175 și 199 HV10, față de 221 HV10 pentru metalul de bază. Împrăștierea spațială este importantă, poziția din dreapta cordonului coborând repetat la 151 HV10. Retopirea scade valoarea medie cu 27–37 HV10 pe toate cele patru probe tratate, dar reduce abaterea standard de la 15–26 HV10 la 8–11 HV10. Pe ansamblul indentărilor, media scade de la 186,9 HV10 (abatere standard 20,3 HV10, 45 de determinări) la 157,1 HV10 (abatere standard 11,7 HV10, 36 de determinări), respectiv o pierdere de circa 30 HV10, echivalentă cu 16

% din valoarea inițială, însoțită de o reducere cu circa 42 % a dispersiei. Concluzia măsurătorii este univocă: în fereastra de parametri utilizată, omogenizarea statistică s-a produs, dar durificarea nu.

Trei cauze pot explica acest rezultat. Prima este oxidarea suprafeței libere, confirmată de analiza chimică prezentată în continuare, care reduce secțiunea metalică efectivă aflată sub indenter. A doua este revenirea structurii de solidificare rapidă la al doilea ciclu termic, în condițiile unei răcirii naturale, fără călire forțată. A treia ar fi diluția cu substratul, scenariu pe care examinarea secțiunilor nu îl susține ca mecanism dominant, întrucât zona retopită rămâne circumscrisă la suprafață. Separarea primelor două cauze necesită determinarea profilului de duritate pe secțiune, după îndepărtarea stratului de oxid, măsurătoare prevăzută în programul experimental de optimizare.

Analiza chimică prin SEM–EDX

Analiza chimică semicantitativă a fost efectuată pe aceleași zone examinate microscopic, prin spectrometrie de raze X cu dispersie după energie, în regim de spectru integrat pe arie și prin baleiaj liniar. Rezultatele sunt sintetizate în tabelul 4.

Tabelul 4. Compoziții chimice semicantitative determinate prin SEM–EDX [% masă]

Stare și tip de determinare	Fe	Cr	Ni	Si	O
Brut depus, spectru de arie 1	71,9 ± 1,6	13,8 ± 0,9	11,8 ± 1,6	2,4 ± 0,4	—
Brut depus, spectru de arie 2	70,0 ± 3,2	14,2 ± 1,9	15,8 ± 3,1	—	—
Brut depus, baleiaj liniar	68,4 ± 4,4	14,2 ± 2,7	14,5 ± 4,2	2,8 ± 0,9	—
După retopire, spectru de arie (P1)	69,8 ± 1,0	6,2 ± 0,5	—	—	24,0 ± 1,0
După retopire, baleiaj liniar (P1)	78,6 ± 2,6	—	—	—	21,4 ± 2,6

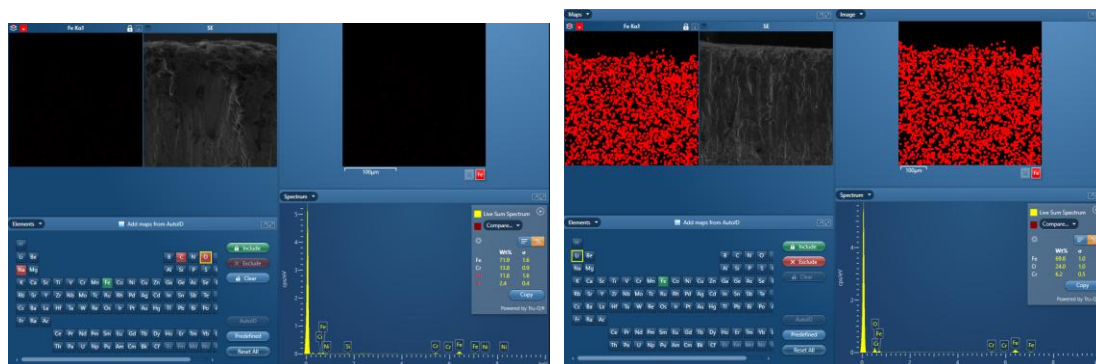


Figura 8. Analiza chimică SEM–EDX: a) strat în stare brut depusă, hartă elementală și spectru integrat; b) strat după retopirea cu fascicul laser, cu semnal de oxigen și scădere aparentă a conținutului de crom.

Spectrele obținute în stare brut depusă confirmă transferul în strat al fierului, cromului, nichelului și siliciului, cu valori de 68–72 % Fe, circa 14 % Cr, 12–16 % Ni și 2,4–2,8 % Si. După retopire apare un semnal de oxigen de 21–24 % masă, însoțit de o scădere a fracției aparente de crom, până la 6,2 % în spectrul de arie al probei P1. Interpretarea corectă a acestui rezultat nu este dispariția cromului din aliaj, ci acoperirea suprafeței libere cu o peliculă de oxid care atenuază semnalul metalic provenit din volumul subiacent.

Consecința tehnologică este importantă pentru etapa de optimizare: omogenizarea geometrică obținută prin retopire este reală, dar este însoțită de o reacție de suprafață care trebuie eliminată prin măsuri de

protecție a băii – geometria duzei, debitul și temporizarea gazului – și nu prin creșterea puterii fasciculului. Prima intervenție prevăzută în etapa următoare este, prin urmare, verificarea sistemului de protecție gazoasă, înaintea oricărei modificări a aportului energetic.

Programul experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser

Pe baza rezultatelor obținute pe setul P1–P5 a fost elaborat programul experimental destinat optimizării procesării cu fascicul laser. Programul separă parametrii menținuți constanți de cei care pot fi variați independent, motivează alegerea factorilor reținuți, stabilește nivelurile de variație și definește structura planului factorial, împreună cu piesa de lucru pe care acesta urmează a fi implementat.

Parametrii menținuți constanți pe durata întregii campanii sunt prezentați în tabelul 5. Aceștia au fost fixați astfel încât diferențele observate între configurații să poată fi atribuite exclusiv factorilor variați.

Tabelul 5. Parametrii de proces menținuți constanți la tratamentul cu fascicul laser

Parametru de proces	Valoare
Sursă laser	sursă cu fibră, lungime de undă ≈ 1070 nm, montată pe celula robotizată
Ghidare și traiectorie	robot industrial multiaxial, cap optic montat pe flanșa robotului
Focalizare	sistem de imagine digitală cu iluminare în ultraviolet
Geometria fasciculului	spot liniar
Lățimea spotului	3 mm
Frecvența sursei	10 kHz
Oscilația transversală a fasciculului	constantă pe durata campaniei
Număr de treceri	una singură, fără aport de pulbere
Gaz de protecție	98 % Ar + 2 % CO ₂
Debit de gaz	15–18 l/min
Unghi de incidență	5–10°, pentru evitarea reflexiei în optică
Răcire după trecere	naturală, fără călire forțată

Factorii reținuți pentru planul experimental sunt puterea fasciculului, defocalizarea și viteza de deplasare. Alegerea lor este motivată fizic: puterea controlează fluxul energetic absolut care ajunge pe piesă; defocalizarea modifică diametrul efectiv al spotului și, odată cu el, densitatea de putere, favorizând regimul de conducție la valori mari și împingând procesul spre regimuri locale de tip crater la valori mici; viteza de deplasare fixează timpul de interacțiune. Cele trei mărimi acționează asupra unor defecte diferite ale stării brut depuse – porozitatea gazoasă și particulele incomplet topite răspund la timpul de menținere a băii, lipsa de fuziune de la interfața dintre cordoane răspunde la densitatea de putere, iar segregăția interdendritică răspunde la energia liniară – și se pot seta independent pe celulă, fără modificări de optică între încercări.

Geometria spotului nu a fost reținută ca factor explicit tocmai pentru că forma liniară și lățimea de 3 mm sunt deja adaptate lățimii cordonului depus; variația ei ar fi impus schimbarea opticii între încercări. Defocalizarea preia controlul densității de putere printr-o singură axă de deplasare. Direcția de scanare și strategia de traiectorie sunt menținute constante, pentru a nu consuma grade de libertate ale planului.

Energia liniară, definită ca raportul dintre puterea fasciculului și viteza de deplasare, constituie metrica rezultantă a campaniei, nu un factor independent. Domeniul acoperit de plan se întinde de la 75 la 250 J/mm.

Nivelurile factorilor și structura planului factorial complet de tip 2^3 , cu două puncte centrale, sunt prezentate în tabelul 6.

Tabelul 6. Planul factorial 2^3 cu două puncte centrale, stabilit pentru optimizarea procesării cu fascicul laser

Nr.	Putere P [W]	Defocalizare [mm]	Viteză v [mm/s]	Energie liniară E = P/v [J/mm]
1	1200	2	8	150
2	2000	2	8	250
3	1200	4	8	150
4	2000	4	8	250
5	1200	2	16	75
6	2000	2	16	125
7	1200	4	16	75
8	2000	4	16	125
C1	1600	3	12	133 (punct central)
C2	1600	3	12	133 (replică centrală)

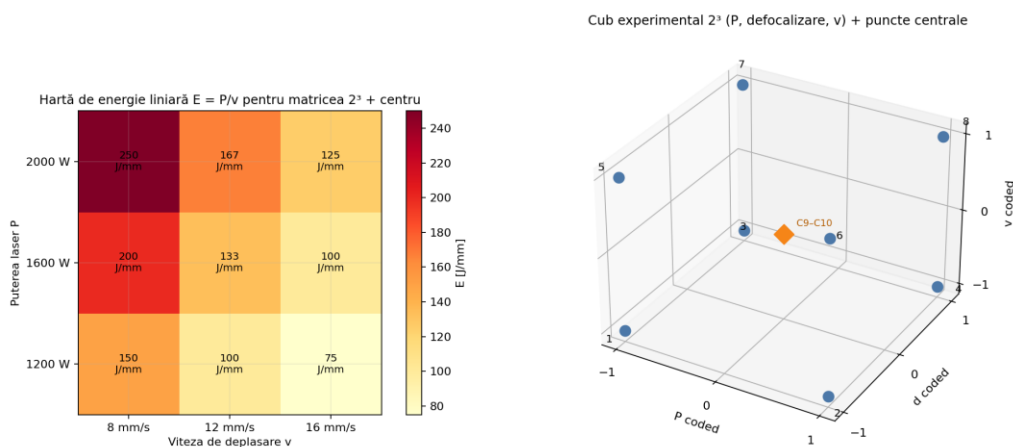


Figura 9. a) Harta energiei liniare pe domeniul planului experimental; b) reprezentarea planului factorial 2^3 în spațiul factorilor putere – defocalizare – viteză, cu punctele centrale.

Punctele centrale nu sunt două încercări suplimentare oarecare. Ele estimează eroarea pură a procesului și semnaleză curbura răspunsului: dacă media valorilor măsurate în centru se abate semnificativ de la interceptul modelului liniar, domeniul trebuie restrâns sau planul trebuie extins la un plan compus central. Configurația de referință cu care se deschide campania este punctul central, situat între capătul de 75 J/mm, unde există riscul unei urme incomplete, și cel de 250 J/mm, unde există riscul de oxidare și de formare a craterelor.

Implementarea planului impune o piesă de lucru cu suprafață depusă suficientă pentru cele opt combinații de colț plus cele două puncte centrale, realizate pe același substrat și din aceeași șarjă de depunere. Geometria prismatică a probelor P1–P5, corectă pentru caracterizare, nu satisface această condiție. Din acest motiv a fost adoptată geometria inelară: pe un disc cu depunere circulară continuă încap sectoarele necesare, fiecare primind o singură combinație de parametri, iar comparația între configurații se face pe aceeași piesă.



Figura 10. Proba inelară după aplicarea tratamentului cu fascicul laser pe sectoare distincte. Sectoarele numerotate corespund încercărilor planului factorial.

Aspectul piesei după tratament validează fezabilitatea soluției: urmele tratate apar ca benzi lucioase, separate de culori de revenire a căror intensitate variază de la un sector la altul, ceea ce reprezintă semnătura așteptată a unui plan care baleiază domeniul 75–250 J/mm. Nu se declară în această etapă un sector optim, întrucât duritatea pe sector și analiza chimică pe sector fac obiectul etapei următoare; fotografia confirmă însă că tratamentul a putut fi aplicat pe întreaga circumferință, fără străpungere vizibilă și fără fisuri macroscopice care să invalideze piesa.

Realizarea probelor inelare pentru încercările de uzură

Evaluarea funcțională a straturilor a fost efectuată prin încercări de uzură abrazivă, pe probe realizate special în acest scop. Substratul este un disc din oțel cu diametrul exterior de 106,4 mm și grosimea de 5 mm, prevăzut cu alezaj central de 10 mm pentru fixarea pe platforma aparatului. Depunerea este inelară, cu diametrul exterior de 88 mm și diametrul interior de 50 mm, cu grosimea nominală de 1 mm, ceea ce corespunde unei suprafețe depuse de circa 41 cm², dispusă exact pe traseul de contact al roților abrazive.

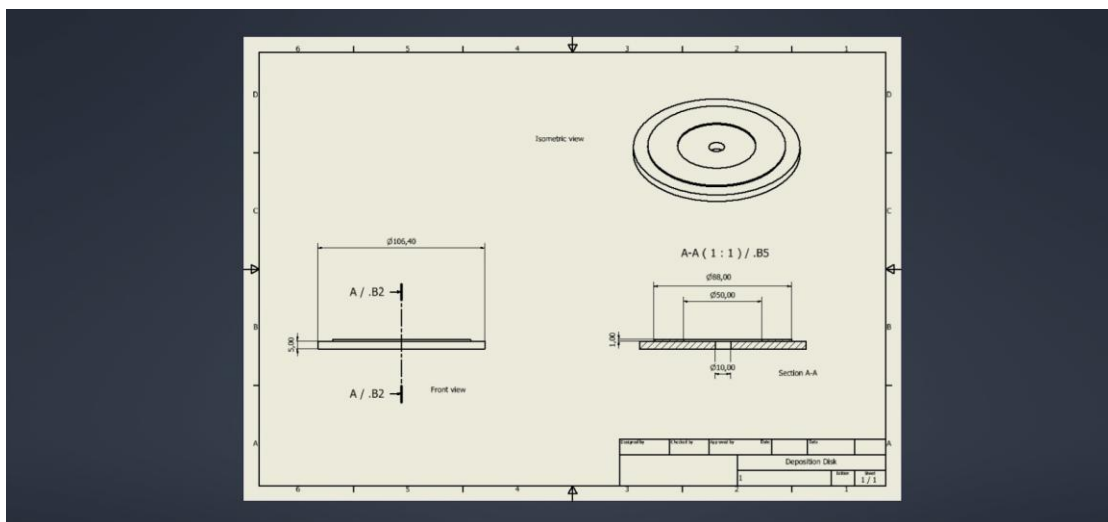


Figura 11. Desenul discului de depunere: vedere izometrică, vedere frontală și secțiune, cu dimensiunile substratului și ale coroanei depuse.

Traectoria de depunere a fost generată în mediul de programare al echipamentului de depunere laser, pe modelul coroanei circulare. Strategia de umplere este de tip zigzag, cu pasul orientat către curba de ghidare și cu sens de parcurgere orar, cu punct de pornire modificabil, astfel încât acumularea termică să nu se concentreze într-o singură zonă a inelului. Limitarea umplerii la conturul modelului s-a făcut cu un decalaj de $0,15$ mm, valoare care compensează extinderea laterală a băii metalice dincolo de traiectoria programată a centrului spotului – abatere identificată și cuantificată în faza anterioară pe depunerile pătrate.

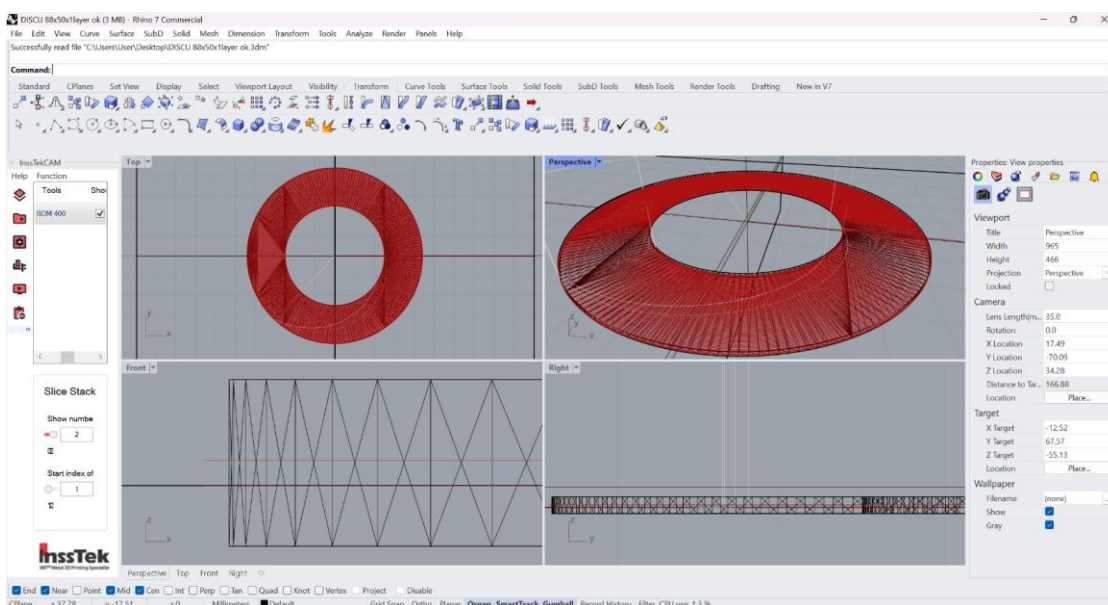


Figura 12. Traectoria de depunere generată pe modelul coroanei circulare, cu vizualizarea straturilor și a stivei de secțiuni.

Tabelul 7. Parametrii de realizare a depunerilor inelare

Parametru	Valoare
Procedeu	depunere directă cu energie concentrată cu fascicul laser (DED-LB), cu pulbere suflată
Geometria depunerii	coroană circulară $\varnothing 88 / \varnothing 50$ mm, pe disc substrat $\varnothing 106,4 \times 5$ mm

Parametru	Valoare
Strategia de umplere	zigzag, pas orientat către curba de ghidare, sens orar
Decalaj de limitare a umplerii	0,15 mm
Număr de straturi	1 strat – probe pentru încercarea de uzură; 2 straturi – probe pentru tratamentul cu fascicul laser
Înălțime de strat programată	0,15 mm
Viteză de parcurgere a traiectoriei	550 mm/min
Dozarea alimentatoarelor de pulbere	gravimetrică, conform compoziției fiecărui amestec (de exemplu 4 g + 6 g pentru amestecul M1, corespunzător raportului 40/60 matrice – pulbere compozită)
Temporizare între straturi	8 s
Temporizare între contur și umplere	5 s
Durata de alimentare cu pulbere	60 s
Gaz de protecție	aplicat pe durata întregului proces
Înălțime de degajare / distanță de deplasare rapidă	70 mm / 20 mm

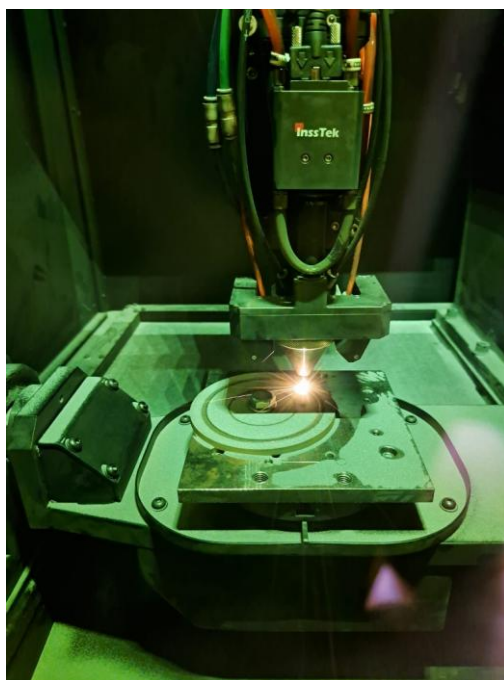


Figura 13. Realizarea depunerii inelare pe echipamentul de depunere laser: interacțiunea dintre fasciculul laser și fluxul de pulbere în timpul procesului.

Au fost realizate trei perechi de discuri, corespunzătoare amestecurilor M0, M1 și M2. Aspectul pieselor după depunere, prezentat în figura 14, diferă semnificativ de la un material la altul. Discurile din amestecul de referință M0 prezintă o coroană puternic colorată, cu nuanțe de interferență auriu-albăstrui, caracteristice peliculelor de oxid formate la câteva sute de grade Celsius, și o textură de suprafață neregulată. Discurile din amestecurile M1 și M2 au coroana continuă, de culoare metalică uniformă, cu urmele de depunere clar delimitate și fără colorații extinse de oxidare. Diferența confirmă, la scara acestei geometrii, observația din faza anterioară privind comportarea termică și metalurgică distinctă a amestecului de referință față de sistemele compozite metal–carbura.

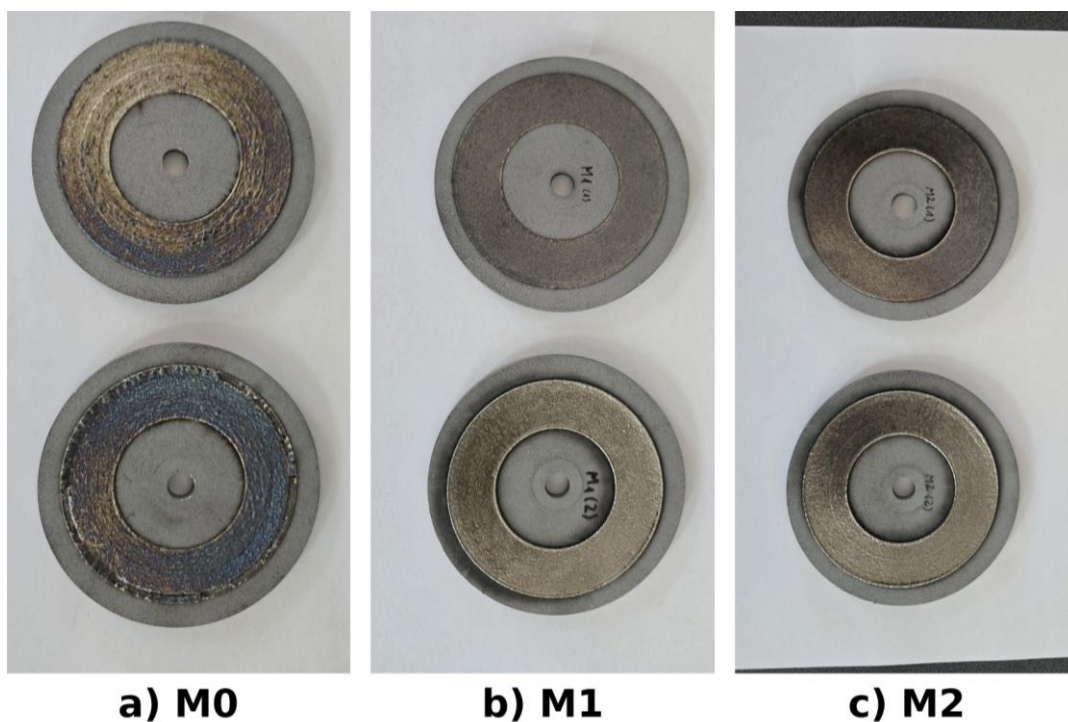


Figura 14. Aspectul discurilor cu depunere inelară, pentru fiecare material câte un disc cu un strat depus, destinat încercării de uzură, și un disc cu două straturi depuse, destinat tratamentului cu fascicul laser: a) amestecul M0; b) amestecul M1; c) amestecul M2.

Încercările de uzură abrazivă și rezultatele obținute

Încercările s-au efectuat pe aparatul de uzură abrazivă cu platformă rotativă din dotarea ISIM, de tip Taber 5135. Proba se fixează pe platforma rotativă, iar două role abrazive, montate pe brațe articulate independente, sunt apăsate pe suprafața depusă. Rotația platformei antrenează rolele, care se rostogolesc pe traiectorii încrucișate; rezultă o urmă de uzură inelară, iar solicitarea combină abraziunea prin rostogolire cu o componentă de alunecare, condiție reprezentativă pentru uzura abrazivă a suprafețelor industriale. Sistemul de aspirație menține zona de contact curată, evitând acumularea produselor de uzură între rolă și probă.

Tabelul 8. Condițiile încercării de uzură abrazivă

Condiție de încercare	Valoare
Echipament	aparat de uzură abrazivă cu platformă rotativă Taber 5135, inv. 3555
Sarcină de apăsare pe fiecare brat	1000 g
Turația platformei	60 rot/min
Aspirație	activată pe durata întregii încercări
Suprafața solicitată	coroana depusă Ø88 / Ø50 mm
Program de încercare	serii succesive de 100, 200, 300, 400, 400 și 400 de cicluri, cu cântărire după fiecare serie
Număr total de cicluri	1800
Mărime măsurată	pierdere de masă față de masa inițială a probei



Figura 15. a) Aparatul de uzură abrazivă cu platformă rotativă, cu proba fixată și rolele abrazive coborâte în poziția de lucru; b) contragreutatea de 1000 g utilizată pentru apăsarea rolei abrazive.

Cele trei probe au fost cântărite înainte de încercare și după fiecare serie de cicluri, cu aceeași balanță și în aceleași condiții. Masele inițiale au fost de 357,548 g pentru proba M0, 344,280 g pentru proba M1 și 351,225 g pentru proba M2. Programul de încercare a fost construit progresiv, cu serii scurte la început și serii mai lungi ulterior, pentru a surprinde atât regimul de rodaj, în care se îndepărtează stratul superficial neregulat al depunerii brute, cât și regimul stabilizat, în care solicitarea acționează asupra materialului propriu-zis al stratului. Rezultatele sunt prezentate în tabelele 9 și 10 și ilustrate în figurile 16 și 17.

Tabelul 9. Pierdere cumulată de masă în funcție de numărul cumulativ de cicluri de uzură [g]

Probă	100 cicluri	300 cicluri	600 cicluri	1000 cicluri	1400 cicluri	1800 cicluri
Proba M0	0,158	0,276	0,392	0,498	0,597	0,666
Proba M1	0,099	0,122	0,140	0,155	0,157	0,158
Proba M2	0,110	0,142	0,162	0,170	0,174	0,187

Tabelul 10. Indicatorii sintetici ai comportării la uzură

Probă	Pierdere totală de masă la 1800 cicluri [g]	Indice de uzură global [mg/1000 cicluri]	Indice de uzură în regim stabilizat [mg/1000 cicluri]	Raport față de proba M1
M0	0,666	370	228	4,2
M1	0,158	88	15	1,0
M2	0,187	104	21	1,2

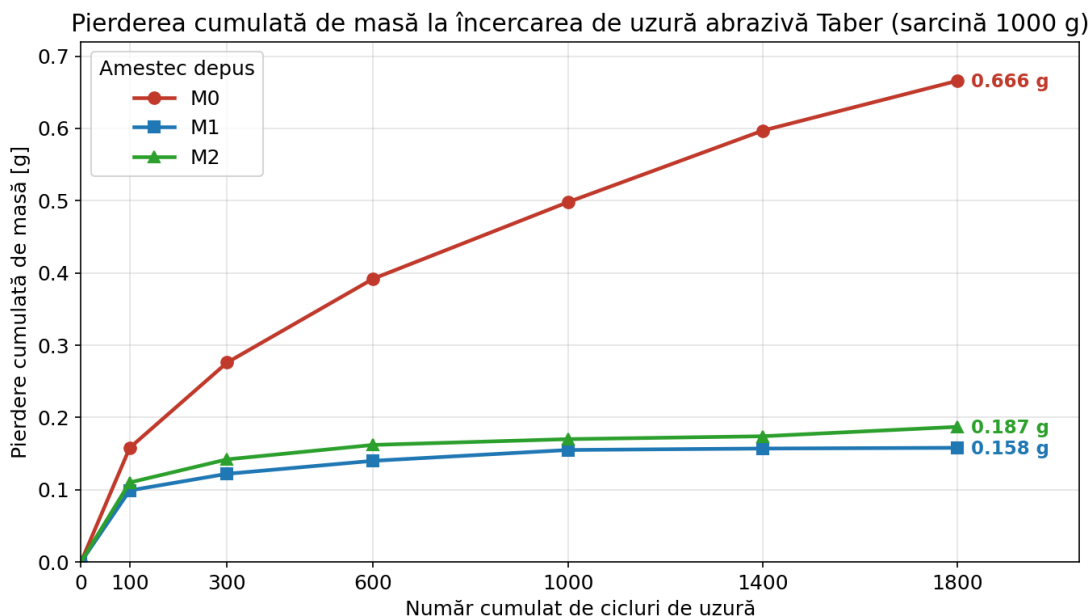


Figura 16. Pierdere cumulată de masă în funcție de numărul de cicluri, pentru cele trei materiale comparate. Curbele suprapuse evidențiază diferența de rezistență la uzură dintre amestecul de referință și sistemele metal-carbură.

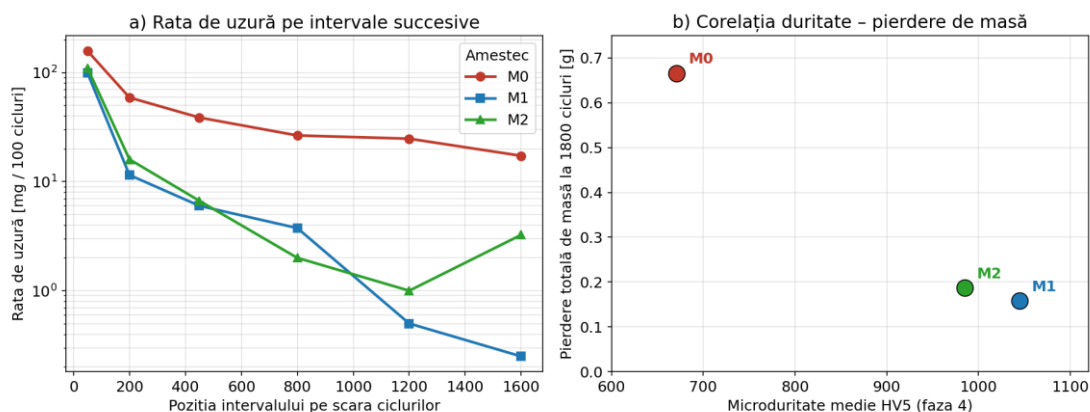


Figura 17. a) Rata de uzură pe intervale succesive, în reprezentare logaritmică; b) corelația dintre microduritatea medie determinată în faza anterioară și pierderea totală de masă la 1800 de cicluri.

Ierarhia rezultată este netă și se menține pe tot parcursul încercării. La 1800 de cicluri, proba M0 pierde 0,666 g, proba M2 pierde 0,187 g, iar proba M1 pierde 0,158 g. Amestecul de referință, lipsit de fază dură dispersată, se uzează de 4,2 ori mai mult decât amestecul M1 și de 3,6 ori mai mult decât amestecul M2. Întrucât densitatea sistemelor cu carburi este sensibil mai mare decât cea a amestecului de referință, diferența exprimată în volum de material îndepărtat este și mai pronunțată: estimată pe baza regulii amestecurilor, pierderea volumică a probei M0 depășește de circa șase ori pe cea a probei M1.

Evoluția ratei de uzură pe intervale succesive arată că diferența nu se produce în faza de rodaj. În primele 100 de cicluri toate cele trei probe pierd cantități comparabile de material – între 99 și 158 mg – întrucât în această etapă se îndepărtează crestele neregulate ale cordoanelor în stare brut depusă, geometrie comună celor trei suprafețe. Diferența apare în regimul stabilizat: pe ultimele 1200 de cicluri, proba M0 continuă să

piardă 228 mg la fiecare mie de cicluri, în timp ce probele M1 și M2 se stabilizează la 15, respectiv 21 mg la fiecare mie de cicluri, adică de aproximativ unsprezece până la cincisprezece ori mai puțin. Curbele probelor M1 și M2 devin practic orizontale după circa 1000 de cicluri, ceea ce indică formarea unei suprafețe portante stabile, în care scheletul de carburi preia contactul cu abrazivul.

Corelarea cu duritatea măsurată în faza anterioară arată că diferența de comportare nu poate fi explicată numai prin duritate. Raportul durităților dintre amestecul M1 și amestecul de referință M0 este de 1,56, în timp ce raportul pierderilor de masă este de 4,2. Un model de uzură abrazivă controlat exclusiv de duritate ar fi prezis o diferență de aproximativ trei ori mai mică decât cea măsurată. Explicația se află în mecanismul de îndepărtare a materialului: în amestecul de referință, fragilizat de compuși intermetalici formați între titan și elementele matricei și caracterizat în faza anterioară printr-o rețea deschisă de fisuri și prin exfoliere extinsă, materialul este îndepărtat predominant prin microfisurare și desprindere de fragmente, nu prin microașchiere. În sistemele metal-carbură, particulele de carbură de wolfram, bine umectate de matricea pe bază de cobalt, formează un schelet dur cvasi-continuu care se opune pătrunderii granulelor abrazive, iar matricea tenace reține particulele în poziție.

Diferența dintre amestecurile M1 și M2 este, în schimb, modestă. Amestecul M2, cu un conținut de carbură mai mic cu circa 17 % relativ, pierde cu numai 18 % mai multă masă decât amestecul M1 și atinge, la aceeași scară de solicitare, circa 85 % din performanța acestuia. Rezultatul este consistent cu observația din faza anterioară privind palierul de duritate atins peste 44 % carbură de wolfram: peste acest prag, adaosul suplimentar de fază dură nu mai aduce un câștig proporțional, ci crește fragilitatea.

Interpretarea rezultatelor și selecția depunerii cu cele mai bune performanțe

Alegerea depunerii cu cele mai bune performanțe a fost făcută pe baza combinată a celor trei categorii de indicatori disponibili: duritatea, integritatea stratului în stare brut depusă și comportarea la uzură abrazivă. Sinteza criteriilor este prezentată în tabelul 11.

Tabelul 11. Sinteza criteriilor de selecție a depunerii cu cele mai bune performanțe

Amestec	Microduritate medie HV5	Pierdere de masă la 1800 cicluri [g]	Integritatea stratului brut depus	Apreciere de ansamblu
M0	671	0,666	compromisă: exfoliere extinsă, rețea deschisă de fisuri	eliminat; utilizat exclusiv ca referință inferioară pentru uzură
M1	1045	0,158	strat continuu, rețea fină de fisuri, microporozitate ridicată	performanță maximă la uzură, dar fragilitate maximă și fără cale de durificare ulterioară
M2	985	0,187	strat continuu, rețea fină uniformă, micropori rari, margini curate	selectat: duritate și rezistență la uzură apropiate de maximum, distribuție mai omogenă a fazei dure și componentă maraging tratabilă termic

Amestecul de referință M0 este eliminat definitiv. Rezultatul încercării de uzură confirmă, prin măsurare directă, concluzia calitativă a fazei anterioare: un strat fragilizat de compuși intermetalici nu poate asigura o

comportare funcțională acceptabilă, chiar dacă duritatea sa, de 671 HV5, depășește de trei ori duritatea substratului.

Între cele două sisteme metal–carbură, alegerea nu este tranșată de performanța brută la uzură, care le separă cu numai 18 %, ci de criteriile complementare. Amestecul M1 atinge duritatea maximă și pierderea minimă de masă, dar prezintă microporozitatea cea mai ridicată, fragilitatea maximă din sistemele cu carburi și nu conține componentă tratabilă termic, ceea ce îl lipsește de orice cale suplimentară de îmbunătățire. Amestecul M2 atinge 94 % din duritatea și 85 % din performanța la uzură ale amestecului M1, cu o distribuție mai uniformă a fazei dure, cu micropori rari și cu margini curate după prelucrare mecanică, iar componenta maraging de 15 % oferă o cale suplimentară de durificare și de creștere a tenacității matricei prin tratament termic.

În consecință, amestecul M2 a fost selectat ca depunere cu cele mai bune performanțe și constituie configurația de material cu care se deschide etapa de optimizare a parametrilor de depunere. Amestecul M1 este păstrat ca referință superioară de duritate și de rezistență la uzură, față de care se vor raporta rezultatele optimizării.

Rezultatele obținute pe setul P1–P5 completează această decizie cu o condiție tehnologică explicită. Retopirea cu fascicul laser produce efectul geometric urmărit – nivelarea urmelor de depunere și închiderea porilor deschiși la suprafață – dar, în fereastra de parametri utilizată, scade duritatea medie și oxidează suprafața liberă. Optimizarea din etapa următoare nu trebuie, prin urmare, să înceapă prin creșterea puterii fasciculului, ci prin verificarea și corectarea sistemului de protecție gazoasă a băii, urmată de identificarea, în cadrul planului factorial, a configurației care realizează nivelarea fără pierdere de duritate.

Diseminare științifică

În cadrul fazei a fost elaborată o lucrare științifică, care valorifică rezultatele privind comportarea la uzură a straturilor dure multicomponente realizate prin depunere laser din amestecuri de pulberi metalice și metal–carbură. Lucrarea urmează a fi publicată și prezentată în cadrul celei de-a XVII-a ediții a conferinței internaționale „Innovative Technologies for Joining Advanced Materials” – TIMA 2026.

Lucrarea: „Research on the wear behavior of multicomponent hard layers produced via DED-LB laser deposition from metal and metal-carbide powder mixtures” – Cercetări privind comportarea la uzură a straturilor dure multicomponente realizate prin depunere laser DED-LB din amestecuri de pulberi metalice și metal–carbură.

Lucrarea investighează comportarea la uzură a acoperirilor dure multicomponente realizate prin depunere laser cu energie direcționată (DED-LB), din amestecuri de pulberi metalice și metal–carbură. Compozițiile au fost proiectate prin variația raportului dintre matricea metalică și fazele dure pe bază de carbură de wolfram, urmărindu-se obținerea unui echilibru favorabil între duritate, integritatea acoperirii și performanța tribologică.

Straturile depuse au fost evaluate inițial prin examinare macroscopică și prin măsurători de microduritate Vickers, care au evidențiat diferențe semnificative în funcție de compoziție, de conținutul de fază dură și de prezența discontinuităților. Pe baza acestor rezultate preliminare au fost selectate configurațiile cele mai promițătoare pentru evaluarea funcțională ulterioară.

Au fost efectuate încercări de uzură în vederea determinării coeficientului de frecare și a ratei de uzură, precum și a caracterizării suprafețelor uzate rezultate. Rezultatele tribologice au fost corelate cu microduritatea, cu compoziția și cu integritatea acoperirii, o atenție deosebită fiind acordată influenței raportului dintre carbură și matrice asupra mecanismelor de uzură. Studiul urmărește identificarea unei configurații de material care să asigure un echilibru optim între duritate, rezistență la fisurare și comportare la uzură, în vederea optimizării ulterioare a acoperirilor DED-LB.

Rezultatele fazei au fost diseminate, de asemenea, prin actualizarea paginii proiectului cu rezumatul fazei și cu alte informații relevante privind rezultatele obținute.

Rezultatul principal al fazei îl constituie caracterizarea completă a straturilor dure depuse prin tehnologii laser și selectarea, pe criterii obiective de duritate, de integritate și de comportare la uzură, a depunerii cu cele mai bune performanțe, împreună cu programul experimental care fundamentează optimizarea parametrilor de depunere în etapa următoare.

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 tinte stabilite și indicatorii asociați pentru monitorizare și evaluare).

Correspondența dintre activitățile planificate și rezultatele obținute în cadrul Fazei 5 poate fi sintetizată astfel:

Rezultat planificat	Rezultat obținut	Grad de realizare
Pregătirea probelor cu straturi depuse realizate din materialele obținute în faza anterioară	Au fost pregătite cinci cupoane prismatice (P1–P5), lustruite și marcate pe o grilă spațială unitară, precum și șase discuri cu depunere inelară, realizate din amestecurile M0, M1 și M2, câte două pentru fiecare material	Realizat integral
Caracterizarea straturilor depuse prin analize structurale	Au fost efectuate examinări macroscopice de suprafață și de secțiune, examinări SEM la mărimi de $\times 100$, $\times 500$, $\times 1000$ și $\times 2500$, precum și analize chimice semicantitative SEM–EDX, în condiții identice înainte și după tratamentul cu fascicul laser	Realizat integral
Caracterizarea straturilor prin încercări mecanice de duritate	Au fost efectuate 81 de determinări HV10 pe grila stânga–centru–dreapta, în stare brut depusă și după tratament, cu evaluarea valorilor medii și a dispersiei	Realizat integral
Caracterizarea straturilor prin încercări de uzură	Au fost efectuate încercări de uzură abrazivă pe platformă rotativă, cu sarcina de 1000 g, pe trei materiale, până la 1800 de cicluri, cu determinarea pierderii de masă, a ratei de uzură pe intervale și a indicilor de uzură	Realizat integral
Caracterizarea straturilor prin încercări de coroziune	Problele au fost realizate și caracterizate structural; încercările de coroziune urmează a fi efectuate și raportate în etapa următoare	Realizat parțial
Prelucrarea și analizarea datelor experimentale; evaluarea rezultatelor și alegerea depunerii cu cele mai bune performanțe	Datele au fost prelucrate statistic și corelate cu rezultatele fazei anterioare; a fost selectat amestecul M2 ca depunere cu cele mai bune performanțe, cu justificarea tehnică a alegerii	Realizat integral
Program experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser	A fost stabilit planul factorial complet 2^3 cu două puncte centrale, cu factorii, nivelurile și parametrii constanți definiți, și a fost realizată piesa de lucru inelară pe care acesta se implementează	Realizat integral
Elaborare lucrare științifică	A fost elaborată o lucrare științifică privind comportarea la uzură a straturilor dure multicomponente, care urmează a fi publicată și prezentată la conferința internațională TIMA 2026	Realizat integral
Diseminare rezultate obținute în cadrul fazei	A fost actualizată pagina proiectului cu rezumatul fazei și cu alte informații relevante privind rezultatele obținute	Realizat

Rezultat planificat	Rezultat obținut	Grad de realizare
Elaborare raport de cercetare și raport de activitate al fazei 5	Au fost elaborate raportul de cercetare și raportul de activitate ale fazei	Realizat integral

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

- probele cu straturi depuse, pregătite pentru examinări structurale, pentru măsurători de duritate și pentru încercări de uzură;
- rezultatele examinărilor macroscopice, ale microscopiei electronice cu baleiaj și ale analizei chimice SEM-EDX;
- rezultatele măsurătorilor de duritate înainte și după tratamentul cu fascicul laser, cu evaluarea valorii medii și a dispersiei;
- rezultatele încercărilor de uzură abrazivă pentru cele trei materiale comparate, cu indicatorii sintetici asociați;
- programul experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser, cu planul factorial 2^3 și piesa de lucru inelară asociată;
- selecția fundamentată a depunerii cu cele mai bune performanțe;
- lucrarea științifică aferentă fazei;
- raportul de cercetare și raportul de activitate;
- materialele de promovare și informațiile necesare actualizării paginii proiectului.

Continuarea activităților în etapele următoare ale proiectului

Rezultatele obținute în cadrul Fazei 5 furnizează configurația de material, indicatorii de performanță și programul experimental necesare continuării programului de cercetare. Prin selectarea amestecului M2 și prin păstrarea amestecului M1 ca referință superioară, domeniul de investigare a fost restrâns la variantele cu perspectivă tehnologică demonstrată prin măsurători de duritate și prin încercări funcționale.

În Faza 6, intitulată „Cercetări privind optimizarea parametrilor de depunere pentru depuneri extradure”, va fi proiectat programul experimental factorial destinat realizării depunerilor extradure și va fi implementat pe piesa de lucru realizată în faza curentă. Straturile obținute vor fi caracterizate prin încercări mecanice, prin examinări nedistructive și prin analize structurale, în scopul optimizării parametrilor de depunere.

Datele experimentale vor fi prelucrate și analizate, iar pe baza evaluării rezultatelor vor fi selectați parametrii optimi de depunere cu fascicul laser. Prelucrarea va valorifica structura planului factorial stabilit în faza curentă: coeficienții modelului liniar și ai interacțiunilor vor fi estimați pe cele opt combinații de colț, iar cele două puncte centrale vor furniza estimarea erorii pure și testul de curbură, pe baza căruia se va decide dacă domeniul trebuie restrâns sau planul extins la un plan compus central.

Pe baza rezultatelor obținute va fi elaborată o propunere de brevet de invenție privind soluția tehnică de durificare prin depunere laser a compozitelor metal-carbură, precum și o lucrare științifică dedicată optimizării parametrilor de depunere.

Condiția tehnologică stabilită în faza curentă rămâne valabilă pentru întreaga etapă de optimizare: verificarea și corectarea sistemului de protecție gazoasă a băii metalice precedă orice modificare a aportului

energetic, întrucât analiza chimică a arătat că oxidarea suprafeței libere, iar nu insuficiența puterii fasciculului, este factorul care limitează rezultatul tratamentului în fereastra de parametri investigată până în prezent.

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 și selectarea variantei optime, apoi la optimizarea parametrilor de depunere și, în final, la validarea la nivel de laborator a tehnologiei de depunere.

Rezultatele obținute în cadrul Fazei 5

În raport cu activitățile planificate și cu indicatorii prevăzuți în propunerea de proiect, în cadrul Fazei 5 au fost obținute următoarele rezultate:

R5 – Tehnologii de procesare cu LASER a suprafețelor materialelor investigate

A fost stabilită și aplicată tehnologia de realizare a depunerilor cu geometrie inelară, destinate atât încercărilor funcționale, cât și implementării planului experimental de optimizare. Au fost definite geometria piesei, modelul și traiectoria de depunere, strategia de umplere, numărul de straturi, decalajul de limitare a conturului, dozarea gravimetrică a alimentatoarelor de pulbere, temporizările de proces și condițiile de protecție gazoasă.

A fost stabilită totodată tehnologia de tratament cu fascicul laser aplicat după depunere, cu parametri menținuți constanți consemnați integral și cu domeniul de variație al parametrilor reglabili. Efectul tehnologic al tratamentului a fost cuantificat: nivelarea urmelor de depunere și închiderea porilor deschiși la suprafață sunt obținute, dar sunt însoțite, în fereastra investigată, de o scădere a durității medii și de oxidarea suprafeței libere.

R6 – Program experimental în vederea optimizării tehnologiilor

A fost elaborat programul experimental destinat optimizării procesării cu fascicul laser. Programul separă parametrii constanți de cei variabili, motivează fizic alegerea celor trei factori reținuți – puterea fasciculului, defocalizarea și viteza de deplasare – și stabilește nivelurile de variație ale acestora, corespunzătoare unui domeniu de energie liniară de 75–250 J/mm.

Programul definește structura planului factorial complet de tip 2^3 , cu două puncte centrale destinate estimării erorii pure și testului de curbura, precum și variabilele de răspuns măsurabile pe fiecare configurație. A fost realizată și validată vizual piesa de lucru inelară pe care planul urmează a fi implementat, tratamentul putând fi aplicat pe întreaga circumferință fără străpungere și fără fisuri macroscopice.

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

Au fost elaborate rezultatele analizelor, încercărilor și evaluărilor pentru materialele investigate. Caracterizarea structurală cuprinde macrografii de suprafață și de secțiune, imagini SEM la patru mărimi și analize chimice semicantitative SEM–EDX, efectuate în condiții identice înainte și după tratamentul cu fascicul laser.

Determinările de duritate cuprind 81 de indentări HV10, dispuse pe o grilă spațială unitară, cu valorile individuale, mediile și abaterile standard pe probă și pe poziție. Rezultatele arată o scădere a durității medii de la 186,9 la 157,1 HV10 după tratament, însoțită de o reducere cu circa 42 % a dispersiei valorilor măsurate.

Încercările de uzură abrazivă au fost efectuate pe trei materiale, în condiții identice de sarcină, de turație și de program de cicluri, până la 1800 de cicluri, cu determinarea pierderii cumulate de masă după fiecare serie. Rezultatele stabilesc o ierarhie netă – 0,158 g pentru amestecul M1, 0,187 g pentru amestecul M2 și 0,666 g pentru amestecul de referință M0 – și arată că diferența dintre sistemele compozite și amestecul de referință se manifestă în regimul stabilizat, nu în faza de rodaj.

Rezultatele au fost interpretate metalurgic și corelate cu datele fazei anterioare. A fost evidențiat faptul că raportul pierderilor de masă (4,2) depășește net raportul durităților (1,56), ceea ce demonstrează că mecanismul dominant de îndepărtare a materialului în cazul amestecului de referință este microfisurarea și desprinderea de fragmente, iar nu microașchierea controlată de duritate.

R9 – Pagina web a proiectului

A fost actualizată pagina proiectului cu rezumatul Fazei 5 și cu alte informații relevante privind rezultatele obținute, prin prezentarea obiectivului fazei, a activităților desfășurate, a metodelor de caracterizare utilizate și a principalelor rezultate. 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

A fost elaborată lucrarea științifică aferentă fazei, intitulată „Research on the wear behavior of multicomponent hard layers produced via DED-LB laser deposition from metal and metal-carbide powder mixtures”, care prezintă proiectarea compozițiilor prin variația raportului dintre matricea metalică și fazele dure pe bază de carbură de wolfram, evaluarea preliminară prin examinare macroscopică și microduritate, selecția configurațiilor promițătoare și rezultatele încercărilor de uzură, corelate cu duritatea, compoziția și integritatea acoperirii. Titlul, colectivul de autori și rezumatul lucrării sunt prezentate în raportul de cercetare al fazei.

R12 – Participări la conferințe naționale și internaționale

Lucrarea științifică elaborată în cadrul fazei urmează a fi prezentată și publicată în cadrul celei de-a XVII-a ediții a conferinței internaționale „Innovative Technologies for Joining Advanced Materials” – TIMA 2026, manifestare dedicată tehnologiilor inovative de îmbinare a materialelor avansate. Participarea asigură expunerea rezultatelor proiectului în fața comunității științifice internaționale de profil și facilitează contactul cu grupuri de cercetare care activează în domeniul ingineriei suprafețelor și al fabricației aditive metalice.

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

Au fost pregătite materiale pentru promovarea rezultatelor Fazei 5, care prezintă comparativ comportarea la uzură a straturilor realizate din cele trei materiale investigate, câștigul de durabilitate adus de fracția de carburi și efectul tratamentului cu fascicul laser asupra omogenității stratului. 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 5, în care sunt prezentate în detaliu probele analizate și fluxul experimental, echipamentele și condițiile de examinare, rezultatele caracterizării structurale și chimice, determinările de duritate înainte și după tratament, realizarea probelor inelare, condițiile și rezultatele încercărilor de uzură, interpretarea metalurgică a rezultatelor, selecția depunerii cu cele mai bune performanțe și programul experimental de optimizare a procesării cu fascicul laser. 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	Tehnologia de realizare a depunerilor inelare și tehnologia de tratament cu fascicul laser aplicat după depunere, cu parametrii de proces stabiliți și efectul tehnologic cuantificat	Realizat
R6	Program experimental în vederea optimizării procesării cu fascicul laser, cu planul factorial 2^3 cu două puncte centrale și piesa de lucru asociată	Realizat
R7	Rezultatele analizelor structurale și chimice, ale determinărilor de duritate și ale încercărilor de uzură abrazivă pentru materialele investigate	Realizat
R9	Actualizarea paginii proiectului cu rezumatul fazei și cu informațiile relevante privind rezultatele obținute	Realizat
R10	O lucrare științifică aferentă fazei	Realizat
R12	Participare la conferința internațională TIMA 2026	Realizat
R13	Materiale și activități de promovare a proiectului și a rezultatelor fazei	Realizat
R14	Raport de cercetare și raport de activitate al Fazei 5	Realizat

Prin rezultatele obținute, Faza 5 și-a îndeplinit obiectivul privind caracterizarea straturilor depuse dure obținute prin tehnologii laser. Straturile au fost caracterizate structural, chimic și mecanic, comportarea funcțională a materialelor selectate a fost cuantificată prin încercări de uzură abrazivă, iar depunerea cu cele mai bune performanțe a fost aleasă pe criterii obiective. Programul experimental elaborat și piesa de lucru realizată asigură baza tehnică și metodologică necesară continuării cercetărilor privind optimizarea parametrilor de depunere pentru depuneri extradure.

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