



ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: INGINERIE TEHNOLOGICĂ ŞI MANAGEMENT INDUSTRIAL

Constantin Cristinel GÎRDU

**Cercetări privind tăierea cu laserul a
pieselor din oţel HARDOX**
**Research on laser cutting of HARDOX
steel parts**

REZUMAT

Conducător științific

Prof. dr. ing. Mircea-Viorel DRĂGOI

BRAŞOV, 2022

Pg.	Pg.
rez.	teză

Contents

PREAMBUL	2/10
CAPITOLUL 1 Introducere	3/12
1.3 Organizarea tezei de doctorat	3/15
CAPITOLUL 2 Stadiul actual al cercetării științifice în domeniul utilizării laserelor la tăierea oțelurilor	4/17
2.3 Aplicații ale laserelor	4/29
2.3.1 Aplicațiile industriale	4/29
2.4.2.8 Aplicațiile laserelor în industrie.....	4/57
2.5 Concluzii asupra stadiului actual al cercetărilor	5/59
CAPITOLUL 3 Obiectivele tezei de doctorat	6/62
CAPITOLUL 4 Cercetări teoretice asupra interacțiunii dintre laser și materialele metalice	7/64
4.2 Transformarea politropă a gazului asistent	7/66
4.3 Presiunea gazului în tubul laser	8/68
4.4 Interacțiunea radiație-substanță.....	10/71
4.5 Energia consumată în procesul tehnologic de tăiere cu laserul	11/74
4.7 Concluzii	12/78
CAPITOLUL 5 Cercetări experimentale privind rugozitatea, duritatea, lățimea de tăiere și înclinarea suprafețelor pieselor fabricate prin tăiere cu laserul	13/80
5.1 Material și metodă.....	13/80
5.2 Proiectarea experimentelor	13/84
5.4 Selectarea planului experimental adecvat cercetării.....	14/96
5.6 Infrastructura de cercetare.....	14/102
5.7 Desfășurarea cercetării experimentale	16/110
5.8 Prelucrarea datelor experimentale	17/114
5.8.1 Oțel HARDOX400 cu grosimea de 10 mm	17/114
5.8.1.1 Influența parametrilor de tăiere asupra durității suprafeței	17/117
5.8.1.2 Influența parametrilor de tăiere asupra rugozității suprafeței.....	19/126
5.8.1.3 Influența parametrilor de tăiere asupra lățimii de tăiere.....	21/134
5.8.2 Oțel HARDOX400 cu grosimea de 8 mm.....	24/145
5.8.2.1 Influența parametrilor de tăiere asupra durității suprafeței.....	24/145
5.8.2.2 Influența parametrilor de tăiere asupra rugozității suprafeței.....	25/151
5.8.2.3 Influența parametrilor de tăiere asupra lățimii de tăiere.....	27/160
5.8.2.4 Influența parametrilor regimului de tăiere asupra înclinării suprafeței prelucrate...30/167	
5.9 Concluzii	31/171
CAPITOLUL 6 Validarea practică a modelelor matematice determinate	33/176
6.1 Validarea relației pentru estimarea rugozității.....	33/177
6.2 Validarea relației pentru estimarea durității	34/178
6.2 Concluzii	34/183
CAPITOLUL 7 Concluzii finale	35/184
7.1 Concluzii generale	35/184
7.2 Contribuțiile personale ale tezei de doctorat.....	35/184
7.3 Valorificarea și diseminarea rezultatelor cercetării științifice	36/185
7.4 Direcții de dezvoltare a cercetării.....	39/189
Bibliografie (selectiv)	40/198

PREAMBUL

Motivația prezentei teze de doctorat este dată de o oarecare lipsă a unor baze științifice pe care să se sprijine practica de producție în utilizarea laserului cu CO₂ pentru fabricarea produselor industriale din materiale metalice de tipul aliajelor HARDOX.

Teza de doctorat constituie un studiu care își propune să aducă unele contribuții teoretice și practice care ar putea fi utile cercetărilor, specialiștilor din mediul academic și din industrie, privind funcționarea și utilizarea dispozitivelor cu laser, precum și a aplicațiilor lor în prelucrarea și fabricarea pieselor din construcția de mașini.

Lucrarea prezintă cadrul teoretic general al formării și propagării luminii laser și domeniile sale de utilizare. În urma unei analize a realizărilor pe plan științific în domeniul utilizării laserului în fabricarea de produse industriale au fost definite obiectivul principal și obiectivele derivate ale tezei de doctorat. În urma stagiului de cercetare doctorală, în care au fost efectuate cercetări teoretice și experimente în domeniul tăierii cu laserul au fost obținute rezultate privind în principal modele și relații matematice care descriu dependența unor factori determinanți pentru proprietățile și calitatea produselor realizate prin tăiere cu laserul de parametrii regimului de lucru. Cercetările au fost orientate către studiul comportării unor oțeluri HARDOX la prelucrarea cu laserul. Alegerea categoriei menționate de materiale a fost motivată de faptul că în literatura de specialitate se constată o oarecare limitare a informațiilor privind aceste oțeluri, de larga sa utilizare în construcția de mașini, și mai ales de faptul că oțelurile HARDOX sunt foarte greu prelucrabile prin tehnologii clasice de așchiere.

Componenta teoretică a cercetării a vizat explicarea unor aspecte referitoare la fenomenele care au loc la interacțiunea laserului cu materialul prelucrat și identificarea unor direcții pentru cercetarea experimentală. Aceasta s-a desfășurat pe baza unor experimente proiectate în maniera clasică, dar și după planuri factoriale complete și fracționate.

Modelarea fizică și matematică a procesului de tăiere cu laserul a oțelului a permis compararea rezultatelor teoretice cu cele practice și evidențierea corelațiilor existente între cele două paliere. Prelucrarea datelor experimentale cu mijloace software avansate a permis obținerea unor rezultate concludente, cu aplicabilitate practică.

Cercetările experimentale au vizat inclusiv aspecte legate de protecția mediului, și anume, consumul specific de energie la prelucrarea cu laserul. Cercetările experimentale au permis identificarea parametrilor de intrare/reglaj ai procesului de tăiere cu laserul care au cea mai semnificativă influență asupra rezultatelor prelucrării. Pe baza celor constatate s-au putut formula recomandări privind regimul de lucru pentru prelucrarea unor oțeluri din gama HARDOX.

Rezultatele cercetărilor au fost validate prin studii de caz.

Apreciam că rezultatele cercetării s-au materializat într-o serie de contribuții originale și concluzii utile atât în plan teoretic cât și practic celor implicați în utilizarea tăierii cu laserul ca procedeu pentru fabricarea produselor industriale.

Se poate concluziona, în urma cercetărilor efectuate pe parcursul elaborării tezei de doctorat că tăierea cu laserul se dovedește a fi un procedeu tehnologic foarte potrivit pentru prelucrarea materialelor greu așchiabile.

CAPITOLUL 1 Introducere

1.3 Organizarea tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat este organizată în 3 părți structurate în 7 capitole. Prima parte cuprinde preambul, introducere și o analiză a stadiului actual al realizărilor în cercetarea științifică privind utilizarea laserelor în fabricația pieselor.

Capitolul 1 al tezei de doctorat prezintă în detaliu procesul tehnologic folosit în fabricația produselor cu destinație industrială bazat pe tăierea cu laserul. Tăierea unei piese cu ajutorul fascicului laser presupune să se coreleze proprietățile caracteristice ale radiației laser cu proprietățile fizice ale materialului pentru a obține precizia dorită. Procesul de tăiere cu laserul este introdus ca tehnologie de prelucrare a produselor bazată pe transformările de fază pe care le suferă materialul. Cercetările efectuate cu dispozitive laser au aplicații în operațiile de prelucrare cu laser (tăiere, găurire și sudură).

Capitolul 2 al tezei de doctorat prezintă istoricul apariției și dezvoltării laserului, revoluția științifică în domeniul laserului din anul 1959 până în prezent. Se prezintă succint producerea efectului laser bazat pe două fenomene de bază: inversiunea populațiilor cu atomi și emisia stimulată, astfel că în urma unui proces de pompaj optic sau de excitare a mediului gazos și de multiplicare a numărului de fotoni rezultă o lumină amplificată – lumina laser. Se prezintă relațiile matematice care descriu efectul laser în tubul laser, laserul cu CO₂, stadiul actual al cercetărilor în domeniul tehnologiilor de prelucrare cu laser, uzinajul cu laser a aliajelor și materialelor metalice.

Pe baza concluziilor formulate la sfârșitul capitolului 2, în capitolul 3 s-au formulat obiectivul principal și obiectivele secundare ale tezei de doctorat.

Capitolul 3 prezintă obiectivele tezei de doctorat și direcțiile de cercetare în pregătirea și derularea unor experimente care să aducă cele mai bune informații despre modul în care sunt influențate duritatea, rugozitate Ra, lățimea de tăiere – kerf de către predictorii. Direcțiile de cercetare sunt axate pe obiective specifice noi: selectare materiale din oțel special, instalații moderne de laser CO₂, planuri experimentale complete sau fracționate, realizarea unor experimente pentru testarea rugozității, durității și lățimii fantei de tăiere, în condițiile producției industriale.

Partea a doua a tezei de doctorat conține capitolele referitoare la cercetarea teoretică și cea experimentală.

Capitolul 4 – cercetările teoretice au vizat câteva aspecte caracteristice laserului cu CO₂. Scopul acestui studiu a fost de a identifica intensitatea laserului la interacțiunea cu metalele socotindu-l cel mai important parametru dedicat prelucrărilor cu laserul. De asemenea, temperatura metalului este un parametru de stare important cu implicații directe asupra prelucrării suprafețelor metalice. Calculul matematic superior asigură tratarea teoretică a fenomenelor care însoțesc interacțiunea fascicului laser cu ținta metalică pentru aplicații practice.

Capitolul 5 – cercetarea experimentală prezintă printre altele materialul și metoda folosită, proiectarea experimentelor, infrastructura de cercetare, colectarea datelor experimentale și prelucrarea lor. Fiecare subcapitol se încheie cu concluzii. Cercetarea experimentală a fost efectuată la SC BYSTRONIC S.A. Brașov, folosind diferite tipuri de instalații laser. La această unitate a fost efectuată cercetarea experimentală de tăiere cu laser CO₂ a plăcilor din HARDOX 400. Datele experimentale au fost obținute prin măsurări efectuate la Laboratorul Universității "Constantin Brâncuși" din Tg-Jiu, Complexul Energetic Oltenia-Laboratorul de măsurări al Termocentralei Rovinari și societatea industrială MIRFO S.A. Prelucrarea datelor s-a efectuat cu pachetul software Statistica 7.0 pentru a stabili modul în care duritatea, rugozitatea și lățimea de tăiere sunt influențate de variația predictorilor.

În partea a III-a a tezei de doctorat sunt prezentate studii de caz și concluziile finale.

Capitolul 6 – prezintă studiile de caz efectuate în vederea validării practice a rezultatelor cercetării experimentale. Relațiile matematice stabilite în capitolul 5 sunt verificate în funcție de parametrii de intrare. Verificarea s-a făcut stabilind o valoare țintă pentru una din caracteristicile de ieșire și selectarea cu ajutorul relațiilor matematice identificate a valorilor predictorilor care teoretic ar

conduce la obținerea valorii țintă. În final se compară rezultatele practice cu cele estimate matematic și se determină abaterea relativă dintre cele două.

Capitolul 7 – Concluzii, sintetizează principalele realizări ale tezei de doctorat, concluziile generale și cele specifice desprinse pe baza rezultatelor cercetărilor efectuate și relevanța rezultatelor. Este evidențiat pentru fiecare caracteristică de ieșire analizată predictorul cel mai influent. În partea finală sunt prezentate contribuțiile personale sintetizate ale tezei de doctorat, modul de valorificare și diseminare a rezultatelor cercetării, și sunt formulate direcțiile posibile de continuare și dezvoltare a cercetării științifice. Lucrarea mai conține lista de figuri, tabele și bibliografia.

CAPITOLUL 2 Stadiul actual al cercetării științifice în domeniul utilizării laserelor la tăierea oțelurilor

2.3 Aplicații ale laserelor

2.3.1 Aplicațiile industriale

În ingineria industrială cel mai utilizat laser este cel cu CO₂, deoarece dispune de un sistem de oglinzi și lentila, capabile să reflecte, amplifice și să focalizeze lumina astfel încât raza laser să dispună de putere suficientă pentru a topi materialul [CHE14].

Principalele procedee tehnologice de prelucrare a materialelor (metale/oțeluri, aliaje neferoase, materiale nemetalice) cu laserul sunt: tăierea, găurirea, sudarea, marcarea, gravarea, în regim de undă continuă, sau pulsant.

La prelucrarea metalelor se pot aplica toate aceste procedee sub rezerva unor restricții privind proprietățile fizice ale materialelor și grosimea semifabricatului [BUZ15]. Aceasta din urmă nu este un factor restrictiv la sudură.

După puterea medie, laserele industriale se clasifică:

- 11 W – gravuri superficiale și tăierea metalelor subțiri;
- 21-41 W – gravură și debitare;
- 41-61 W – gravură și debitarea materialelor mai groase;
- 61-81 W – operații deosebite;
- 81-121 W – tăiere profundă și gravare;
- 1-4 KW – putere, pentru aplicații speciale, tăierea oțelurilor;
- 5-6 KW – tăierea oțelurilor ultradure [DON85], [SAV81], [DRĂ86].

2.4.2.8 Aplicațiile laserelor în industrie

Parametrii cei mai importanți ai unui laser sunt puterea și lungimea de undă [POP75]. O prezentare a aplicațiilor laserelor în operațiile de sudare, găurire și tăiere de materiale sunt descrise în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5 Aplicațiile industriale ale laserelor [POP75]

Dispozitivul laser	Lungimea de undă	Mod de funcționare	Aplicații industriale
Rubin:Cr ⁺³	6,69 μm	pulsat	tăiere, sudare, găurire
Neodim în sticlă	1,06 μm	pulsat	tăiere, sudare, găurire
Ar	0,48 μm	continuu	încălziri
CO ₂	10,6 μm	continuu	tăiere
Neodim în YAG	1,06 μm	Q-comutat	telemetrie, industrie
GaAs	0,90 μm	pulsat	comunicații
He-Ne	0,63 μm	continuu	aliniere

În lucrările [DON85], [SAV81], [DRĂ86] autorii aduc contribuții la extinderea aplicării laserului cu CO₂ și Nd-YAG în activitățile ingineriei industriale, precum și a aplicațiilor în procesele de producție ale tăierii, găuririi și sudării cu laserul în fabricația produselor industriale [PAR17].

Aplicațiile laserelor în industrie se bazează pe energia luminoasă transportată de undele electromagnetice coerente. Laserele produc radiații infraroșii, vizibile și ultraviolete [PUȘ07].

Sursa de căldură a fasciculului laser e concentrată într-o zonă foarte mică pe material [POW09]. Acest rezultat reduce deformarea pieselor. Laserul cu CO₂ și laserul solid sunt instalații pentru debitarea tablelor din metal [WAR19]. Laserul cu fibră asigură productivitate la tăierea plăcilor subțiri. Laserele cu CO₂ sunt utilizate la tăierea tablelor cu grosime mai mare de 5 mm, care necesită putere de lucru mare. În teză se utilizează sintagma lățimea fantei de tăiere (rostul de tăiere), care în lucrările științifice de limbă engleză se numește Kerf, termen de altfel adoptat și în limba română. Se constată din punct de vedere al terminologiei o inconstanță.

Există o serie de lucrări științifice și articole din jurnale care tratează tehnologia de prelucrare cu laserul și îmbunătățirea prin diferite metode a acesteia, după cum se prezintă succint în continuare.

În lucrarea [POC16] autorii definesc eficiența de tăiere și de topire. Se fac cercetări asupra tipului de material, grosimii, lungimii de undă și puterii laserului. Se constată că laserul cu fibră are o eficiență de tăiere mare la tablele cu grosime mică. Eficiența de tăiere scade o dată cu creșterea grosimii materialului. Aceste rezultate se datorează modificării absorbivității zonei de lucru și a zonei influențate termic.

În lucrarea [SEO19] s-a pus în evidență comportamentul fluxului de gaz în duza subsonică și supersonică prin analiză cu interferometrul Nomarsk. Procesul de tăiere a tablelor de oțel inoxidabil cu grosimea de 60 mm a avut loc cu ajutorul unui laser cu puterea de 6 KW. Experimentele au fost derulate pentru a observa efectul configurației geometrice a duzelor. Prin variația distanței duză-piesă s-a determinat capacitatea de eliminare a topiturii formate. Rezultatele arată că duza supersonică are o capacitate de îndepărtare a topiturii la o distanță mai mare.

În cercetarea [HAJ19] se indică o metodă de optimizare a traseului de tăiere cu laser care să acumuleze o căldură minimă. Se apelează la un algoritm genetic cu căutare în vecinătate. Această tehnică este utilă pentru durificarea suprafeței în procesul de sudare unde distanța de lucru și acumularea de căldură trebuie să fie optimizate pentru a obține piese de calitate.

În lucrarea [ZHA20] un colectiv de cercetători arată că la tăierea cu laserul a foilor subțiri de safir cu ajutorul unui fascicul Bessel se obține o conicitate zero și o rugozitate superioară ca ordin de mărime.

O echipă de cercetători [DAR20] a investigat efectul caracteristicilor duzei (dimensiune, diametru) asupra jetului de gaz cu presiune înaltă pentru a îmbunătăți tăierea cu laserul. Prin vizualizare Schlieren se observă că jetul de ieșire din duza supersonică are un debit constant, proprietăți dinamice mai bune și un flux de gaz cu o lungime mai mare ca a jetului de gaz provenit din duza conică.

În lucrarea [ZHO21] echipa de cercetare a studiat lustruirea cu radiație laser a oțelului matrițat S136D folosind un plan experimental ortogonal L16/44. Experimentele au indicat tendința de variație a rugozității suprafeței în funcție de densitatea de energie laser folosind o sursă de căldură laser în mișcare.

În urma analizei unui număr mare de lucrări publicate în cadrul unor conferințe științifice sau publicate în jurnale se constată un larg interes al cercetătorilor pentru examinarea utilizării laserului pentru prelucrarea materialelor [POC18a]. Astfel, se poate identifica în literatură o grupare a temelor cercetărilor în câteva categorii: studiul comportării materialului sub acțiunea laserului, studiul unor procedee tehnologice de prelucrare cu ajutorul laserului (tăiere, găurire, sudare, gravare), studiul influenței parametrilor de intrare ai procesului asupra rezultatelor obținute (rugozitate, duritate, lățime de tăiere) [GÎR19b]. În ultimii ani se constată un interes deosebit pentru tehnologiile aditive aplicate materialelor metalice în care pulberea de material este topită sau sinterizată selectiv cu ajutorul laserului (SLM, SLS). Durificarea materialului cu laserul constituie o modalitate aparte de utilizare a laserului în fabricarea produselor industriale.

2.5 Concluzii asupra stadiului actual al cercetărilor

Din analiza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale publicate în literatura de specialitate se pot desprinde următoarele concluzii privind prelucrarea cu laserul a materialelor:

1. prelucrarea cu laserul a metalului depinde de proprietățile mecanice, optice și termice ale fiecărui tip de material. Conductivitatea termică este o proprietate cheie de care depind condițiile în care se realizează prelucrarea cu laserul;

2. parametri de intrare ai procesului de prelucrare cu laser sunt determinanți pentru rezultatele obținute. Este acordată o atenție specială modului în care fiecare din acești parametri influențează un aspect sau altul al rezultatului obținut. Astfel, cu precădere este analizată influența puterii laserului, vitezei de tăiere și a presiunii gazului asistent asupra rugozității suprafețelor obținute, durității și a rostului de tăiere (lărgimea acestuia și înclinarea flancurilor).
3. în funcție de materialul prelucrat și de condițiile concrete de lucru a fost identificat ca fiind cel mai influent parametru de intrare fie puterea laserului, fie viteza de tăiere;
4. se remarcă diverse modele utilizate pentru proiectarea experimentelor: cu varierea unui singur parametru de intrare, sau cu varierea mai multor parametri simultan. În acest caz se evidențiază planurile factorial complet și fracționat;
5. ca tehnici de investigare se folosesc rețele neurale, algoritmi genetici și inteligența artificială;
6. dacă în literatura de specialitate de limba engleză se folosește exclusiv termenul de Kerf, în limba română se utilizează rost de tăiere sau lățimea de tăiere. De asemenea, în literatura de limba engleză se utilizează "Kerf deviation" pentru referirea la înclinarea flancurilor rostului de tăiere.
7. în funcție de înclinarea flancurilor tăieturii se distinge în secțiunea transversală a tăieturii atât o înclinare convergentă, dar și divergentă (în formă V, sau A).
8. marea majoritate a cercetătorilor studiază Kerf aproape exclusiv sub aspectul lărgimii sale. Se remarcă lucrări științifice care se referă la înclinarea flancurilor tăieturii – Kerf deviation. Lărgimea Kerf e abordată aproape exclusiv prin prisma consumului de energie, niciodată ca aspect tehnologic cu implicații asupra preciziei dimensionale și de formă a conturului prelucrat. Înclinarea flancurilor tăieturii e abordată numai din punctul de vedere al mărimii înclinării, nu și al sensului (forme în secțiune transversală) acestuia;
9. ca instrumente de analiză și interpretare a datelor experimentale sunt utilizate cu precădere pachetele software: Statistica, Minitab și Graph;
10. nu s-au identificat în mod explicit cercetări care să vizeze influența parametrilor de intrare ai procesului de tăiere cu laserul asupra preciziei dimensionale a pieselor. Motivul este acela că indiferent de influența pe care un parametru de intrare sau altul ar avea-o asupra preciziei dimensionale, această influență poate fi compensată din sistemul de conducere numerică a spotului laser de-a lungul conturului teoretic al piesei. De altfel, cel mai important parametru care influențează precizia dimensională a piesei este diametrul spotului laser. În acest context, precizia geometrică poate fi ținută sub control în mod direct de posibilitatea echipamentului CNC de a modifica traiectoria fasciculului laser. Totuși, se poate considera că mai relevantă asupra preciziei dimensionale este dimensiunea Kerf decât diametrul spotului laser [URS86];
11. a fost identificat doar un număr redus de studii asupra oțelurilor cu rezistență mare la uzură, greu prelucrabile prin așchiere.
12. se constată că materialele din gama HARDOX nu au fost studiate suficient (au fost identificate doar patru lucrări cu acest subiect) [ALT19], [MIL20], [PRA13], [PAT11], deși sunt larg utilizate în construcția de mașini, motiv pentru care este un subiect de cercetare deschis.

CAPITOLUL 3 Obiectivele tezei de doctorat

În urma analizei stadiului actual al cercetărilor se constată că majoritatea cercetătorilor consideră ca fiind relevante pentru evaluarea rezultatelor tăierii cu laserul a metalelor dure, rugozitatea și duritatea suprafețelor obținute, precum și caracteristicile rostului de tăiere (Kerf). În aceste condiții cercetările din prezenta lucrare sunt focalizate asupra studiului caracteristicilor menționate. De asemenea, din analiza cercetărilor efectuate pe plan mondial a rezultat că cea mai semnificativă influență asupra rezultatelor prelucrării o exercită parametrii de reglaj ai procesului de tăiere: puterea laserului, viteza de tăiere și presiunea gazului asistent. În consecință, aceștia vor fi parametrii de lucru vizați și în cadrul acestei lucrări. Deși diversitatea materialelor prelucrate cu laserul este foarte mare, se constată o sărăcire a informațiilor din literatura de specialitate privind comportarea oțelurilor dure din gama HARDOX la prelucrarea cu laserul. De asemenea, marea majoritate a cercetărilor prezentate în articolele științifice au fost efectuate în condiții de laborator, fără să fie vizate direct aspecte privind utilizarea în producția industrială a laserului pentru fabricarea pieselor din metal. Pornind de la aceste considerente, pe de o parte păstrând linia generală a cercetărilor

actuale, dar și urmărind aspecte specifice temei prezentei lucrări, pe de altă parte, se formulează următorul obiectiv principal al tezei de doctorat:

“Stabilirea unor modele matematice care să descrie analitic influența pe care o exercită principalii parametri de reglaj ai procesului de tăiere cu laserul asupra calității suprafețelor, parametrilor de conformitate și parametrilor tehnologici ai pieselor din gama HARDOX în cazul fabricării produselor în condițiile producției industriale”

Pentru atingerea acestui obiectiv principal se formulează următoarele obiective secundare:

1. analiza unor fenomene care au loc la tăierea cu laserul a oțelurilor dure și interpretarea modului în care acestea afectează rezultatele prelucrării (rugozitate, duritate, Kerf);
2. identificarea influenței presiunii gazului din tubul laser asupra densității de energie a fasciculului laser;
3. determinarea intensității luminii laser în funcție de intensitatea câmpului electric al radiației;
4. definirea relațiilor matematice pentru calculul energiei necesare tăierii materialului;
5. determinarea unor relații matematice care să reflecte influența fiecărui parametru de intrare (predictor) considerat asupra răspunsurilor care caracterizează rezultatele prelucrării;
6. verificarea și validarea rezultatelor cercetării experimentale prin studii de caz;
7. formularea concluziilor finale ale cercetărilor cu aplicare directă în fabricarea prin prelucrare cu laserul a produselor industriale.

CAPITOLUL 4 Cercetări teoretice asupra interacțiunii dintre laser și materialele metalice

4.2 Transformarea politropă a gazului asistent

Gazul asistent străbate capul de tăiere înconjurând fasciculul laser focalizat de lentilă. Acesta are rolul de menținere termică a fasciculului laser. În duză, gazul curge fiind delimitat de pereții conici, lumina laser este focalizată la o distanță mică față de duză. Duza se încălzește datorită laserului și cineticii gazului [KIM19]. Frecarea gazului de pereții conici produce o uzură a duzei, fapt care impune înlocuirea periodică a acesteia.

Studiul poate considera și modela gazul asistent prin transformarea politropă a unei mase de gaz în condițiile căldurii molare constante [PLĂ77]. Temperatura duzei crește de la T_1 la T_2 deoarece lumina laser pătrunde în duza cu diametre diferite fiind înconjurată de gaz. La intrarea și ieșirea din duză presiunea și volumul gazului variază. Pe măsură ce secțiunea transversală a duzei variază de-a lungul axului acesteia, dacă se ia în considerare un element de volum de înălțime infinit mică la intrarea respectiv la ieșirea din zona conică se poate considera că se produce o variație de volum. Se calculează variația de entropie în aceste condiții (temperatură și volum variabile) și aplicând principiul al II-lea al termodinamicii se introduce o nouă funcție de stare entropia S , a cărei variație e definită prin relația (dU – variația de energie internă, dL – variația de lucru mecanic, dQ – variația infinitezimală a căldurii). Se înlocuiește dL cu pdV conform definiției lucrului mecanic efectuat de gaz [PLĂ77].

Principiul I al termodinamicii scris în funcție de entropie, energia internă și lucrul mecanic devine:

$$TdS = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + pdV \quad (4.6)$$

$$TdS = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right] dV$$

Prin integrare se obține variația de entropie a gazului:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1} - \nu R \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (4.13)$$

Întrucât pentru oxigen indicele politropic are valorile, $\chi=1,2$, $C_v=5/2 \cdot R$, $C_p=7/2 \cdot R$, [HRI84], [PLĂ77] avem $1.2 \cdot 5/2 \cdot R - 7/2 \cdot R$, adică $(3-3.5) \cdot R < 0$. Deci,

$$\chi C_v - C_p \leq 0 \quad (4.17)$$

rezultă că entropia gazului S scade, deci sistemul termodinamic al gazului real O_2 trece dintr-o stare mai puțin ordonată într-o stare ordonată atunci când străbate duza. Prin ordonarea moleculelor, jetul de gaz devine laminar și nu mai este turbulent, ceea ce îi permite să mențină coerența jetului pe o distanță mai mare de la ieșirea din duză. Acest lucru are efect pozitiv asupra modului în care topitura este eliminată din rostul de tăiere. Unii cercetători [ORA19], [DAR20], [KIM19] au remarcat modificările induse jetului de gaz de duzele subsonice și supersonice, fără să fi demonstrat teoretic aceste transformări prin intermediul entropiei jetului de gaz. Unul din efectele trecerii gazului prin duză este scăderea entropiei.

4.3 Presiunea gazului în tubul laser

Gazul laser aflat în tubul laser este un amestec de gaze alcătuit din molecule de bioxid de carbon, azot și heliu. În tubul laser adaosul de azot are rolul de a excita moleculele de CO_2 în vederea generării luminii laser, iar heliul concentrează moleculele de CO_2 spre axul tubului în vederea creșterii luminescenței datorate tranzițiilor laser [SAV81], [DON85].

Inversia de populație în cazul laserului cu CO_2 se obține pe seama transferului rezonant de excitație între azot și bioxid de carbon. Densitatea spectrală de energie a radiației termice este dată de formula lui Planck [VLĂ83], [STE88], [LAN63], [POP00]:

$$I_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{A_{ji}}{B_{ji}} \cdot S \quad (4.18)$$

Aici h este constanta lui Planck, [Js] ν , frecvența luminii [s^{-1}], c viteza luminii [m/s]. A. Einstein a dezvoltat calculul introducând coeficientul de emisie stimulată B_{ji} și coeficientul de emisie spontană A_{ji} . Raportul S dintre tranzițiile induse și cele spontane cu densitatea spectrală de energie este dat de relația matematică [VLĂ83], [STE88], [PLĂ77], [POP00]:

$$S = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{1}{\frac{N_i}{N_j} - 1} \quad (4.19)$$

În care kT este energia moleculei de CO_2 și $h\nu$ energia fotonului [J] ce formează lumina sau poate fi privită ca energia cuantei care este absorbită la tranziția moleculei de CO_2 , N_i și N_j sunt populațiile de electroni distribuite nivelurilor care participă la tranziția laser. În lasere se urmărește obținerea unei inversiuni de populație cât mai ridicate $N_j - N_i > 0$. Raportul S derivă din cercetarea lui Einstein și Planck asupra emisieii radiației.

Pornind de la aceste două relații se determină energia moleculei de CO_2 :

$$\begin{aligned} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 &= \frac{1}{S} \\ e^{\frac{h\nu}{kT}} &= 1 + \frac{1}{S} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Se utilizează pentru dezvoltarea relației 4.20 o metodă de aproximare. Calculul de aproximare determină o valoare posibilă, calculabilă a exponentului. Teoria aproximării se bazează pe dezvoltare în serie Taylor. (4.21) Polinoamele în tehnică aproximează întotdeauna funcțiile dificil de studiat [DRĂ86], [POP00].

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2$$

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2$$
(4.21)

Introducând 4.21 în 4.20

$$1 + \frac{h\nu}{kT} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 = 1 + \frac{1}{S}$$
(4.22)

Se notează raportul $1/kT$ cu y și se obține o ecuație pătratică de variabilă y :

$$\frac{1}{2} \cdot (h\nu)^2 \cdot y^2 + (h\nu) \cdot y - \frac{1}{S} = 0$$
(4.23)

Soluțiile ecuației sunt:

$$y_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + \frac{2}{S}}}{h\nu}$$
(4.24)

Deci, se poate exprima energia moleculei de CO_2 în funcție de raportul S și energia fotonului:

$$kT = \frac{h\nu}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}}$$
(4.25)

cu condiția $S > 0$. În conformitate cu formula fundamentală a Teoriei Cinetico-Moleculare (4.1), presiunea gazului laser se poate scrie [PLĂ77], [MAS03]:

$$p = nkT = n \cdot \frac{h\nu}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}} = \frac{N}{V} \cdot \frac{h\nu}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}} = \frac{N}{N'} \cdot \frac{N'h\nu}{V} \cdot \frac{1}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}}$$
(4.26)

Presiunea gazului laser poate fi exprimată în funcție de numărul N de molecule CO_2 , numărul de fotoni din radiația laser N' , densitatea de energie a fasciculului laser w_E [J/m^3]

$$p = \frac{N}{N'} \cdot w_E \cdot \frac{1}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}}$$
(4.27)

Din relația 4.27 se calculează densitatea de energie a fasciculului laser w_E :

$$w_E = p \cdot \frac{N'}{N} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{S}}\right)$$
(4.28)

Densitatea de energie a fasciculului laser din tub [KAV20] crește odată cu creșterea presiunii gazului laser, depinde de raportul dintre numărul de fotoni și numărul de molecule CO_2 deoarece asigură stabilitate condițiilor de amplificare a radiației în lasere prin pompajul realizat cu molecule de azot

$$w_E = p \cdot \frac{N'}{N} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\left[\frac{N_i}{N_j} - 1\right]^{-1}}}\right) \cong p \cdot \frac{N'}{N} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{N_i}{N_j}}$$
(4.31)

Densitatea de energie a radiației laser depinde de populațiile N_j și N_i (numărul de electroni) $N_j > N_i$, $E_j > E_i$, ale nivelurilor de energie pentru care există inversie de populație, $N_j - N_i >> 0$. Aceasta cere ca în mediul din tubul laser să se pompeze molecule de azot. Sistemul laser lucrează la un regim în care să

se pompeze energie. Populațiile de atomi din mediul activ influențează obținerea energiei laser. O dată cu creșterea diferenței de populații ($N_j - N_i$) se obține o densitate a câmpului de radiație în care emisia laser crește. Se generează o avalanșă de fotoni într-o cavitate rezonantă din tubul laser.

Conform relației (4.31), rezultă că densitatea de energie w_E a luminii laser este proporțională cu presiunea p amestecului de gaze din tubul laser.

4.4 Interacțiunea radiație-substanță

Unii cercetători [POP83], [DON85] au constatat experimental că intensitatea (I) a radiației laser în material este proporțională cu intensitatea câmpului electric (E) propagat prin respectivul material. Totuși, nu a fost identificată și o demonstrație analitică, teoretică a acestei dependențe.

Pentru că vectorul Poynting este în relație directă cu intensitatea câmpului electric, rezultă ecuația pentru distribuția câmpului electric în material [LAN63]:

$$\Delta \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.34)$$

Rezolvând ecuația laplacianului câmpului electric se obține soluția de formă exponențială a câmpului electric (4.35). Soluția Laplacianului obținută utilizând teoria de la ecuațiile fizice-matematice, arată că intensitatea câmpului electric E este o funcție armonică [LAN63], [TEO65]

$$E(t) = E_0(t) \cdot e^{i\omega t} \quad (4.35)$$

În care $E(t)$ este câmpul electric variabil în material, ω este frecvența unghiulară și E_0 amplitudinea câmpului electric.

Relațiile (4.36) reprezintă legile de material, care evidențiază că unele proprietăți electrice și magnetice ale materialelor [KAV20] influențează comportarea lor în câmpul electromagnetic.

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{j} &= \sigma \vec{E} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Aici, \vec{E} – intensitatea câmpului electric al unei laser, \vec{D} – inducția electrică în mediu, \vec{H} – intensitatea câmpului magnetic, \vec{B} – inducția câmpului magnetic, J – densitatea de curent, μ – permeabilitatea magnetică absolută, ε – permitivitatea electrică absolută, σ – conductivitatea electrică.. Starea locală a câmpului electromagnetic este descrisă de acești vectori.

Tot conform [AGÎ56] e definită relația (4.37), a unei electromagnetice în material.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt \quad (4.37)$$

nlocuind soluția Laplacianului (4.35) în (4.37) și dezvoltând în continuare (contribuția autorului) se obține (4.38):

$$I = \frac{E_0^2}{T} \times \frac{T}{2} = \frac{E_0^2}{2} \quad (4.38)''''$$

Conform (4.38), intensitatea unei electromagnetice (fie ea laser sau radiație termică) este proporțională cu pătratul amplitudinii intensității câmpului electric. Aceasta demonstrează analitic cele constatate experimental de autorii citați.

Având în vedere că oțelul are o permeabilitate electrică mult mai mare decât alte materiale (Cu, Al, Ti și aliajele lor) și ținând seamă de relațiile din (4.36) se poate trage concluzia că inducția electrică în oțel este mult mai puternică decât în celelalte medii. Intensitatea radiației laser este mărită când conductivitatea electrică a materialului este ridicată sau rezistivitatea electrică cât mai mică.

4.5 Energia consumată în procesul tehnologic de tăiere cu laserul

Eficiența cu care se efectuează o anumită prelucrare se poate aprecia prin diverși indicatori. În general, eficiența este analizată prin indicatori rezultați din raportarea rezultatelor obținute la resursele consumate. În cazul tăierii metalelor cu laserul, principala resursă consumată este energia, iar rezultatul sunt piesele obținute. Rezultatul astfel exprimat este prea vag, deoarece depinde de (foarte) mulți factori – cantitate, mărime a piesei, material, configurație geometrică, altele. În acest caz, definirea și utilizarea unor indicatori mai sintetici poate fi foarte utilă [KOV87].

În literatura de specialitate problema eficienței este tratată mai degrabă prin situații concrete de prelucrare, vizând anumite materiale și/sau procedee. Astfel, în [SAH11] s-a investigat optimizarea energiei specifice pentru găurirea plăcilor de Kevlar și s-a evaluat această mărime în funcție de viteza de scanare, puterea laserului și diametrul găurii prelucrate. În lucrarea [AHN16] se prezintă o metodă hibridă de prelucrare a materialului utilizând laserul la preîncălzire urmat de tăiere clasică. În [GYO17] autorii înțeleg prin eficiență capacitatea unei instalații laser de a tăia o tablă din oțel cu grosime de până la 60 mm cu puterea de 7.5 KW. În lucrarea [LEE18] se introduce eficiența de tăiere cu laserul a electrozilor pentru bateriile de Li-Ion în funcție de parametrii de tăiere.

Pentru a compara mai elocvent eficiența tăierii cu laserul a metalelor se propune definirea unor indicatori unitari, bazați pe principalii parametri ai regimului de tăiere și pe caracteristici geometrice independente de forma pieselor prelucrate. Pentru a acoperi o gamă cât mai mare de cazuri se definesc trei indicatori unitari [GÎR19], după cum urmează:

1. Energia consumată pentru tăierea unei unități de lungime a conturului:

$$\begin{aligned}
 E_l &= \frac{P \times t}{L} \\
 t &= \frac{L}{v} \\
 E_l &= \frac{P}{v}
 \end{aligned}
 \tag{4.39}$$

Aici s-au notat: E_l – Energie specifică liniară [$W \cdot s/mm$], [J/mm]; P – Puterea laserului [W]; t – timp de prelucrare [s]; L – lungimea marginii laterale a piesei (conturului) [mm]; v – viteza de tăiere [mm/s].

2. Energia consumată pentru tăierea unei unități de suprafață laterală a piesei:

$$\begin{aligned}
 E_s &= \frac{P \times t}{A} \\
 t &= \frac{L}{v} \\
 A &= L \times g = v \times t \times g \\
 E_s &= \frac{P \times t}{v \times t \times g} = \frac{P}{v \times g} = \frac{P}{v} \times \frac{1}{g} = \frac{E_l}{g}
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

în care E_s – Energia specifică de suprafață [J/mm^2]; A – suprafața laterală a piesei [mm^2]; g – grosimea tablei [mm].

3. Energia consumată pentru topirea unei unități de volum de material pentru a detașa piesa din semifabricat. Acest indicator depinde și de dimensiunile Kerf. Acesta ar trebui apreciat pe baza experienței acumulate în prelucrarea în condiții variate, sau chiar prin măsurarea unor piese de probă.

$$\begin{aligned}
 E_V &= \frac{P \times t}{V} \\
 t &= \frac{L}{v} \\
 V &= L \times g \times K \text{ er } f = L \times g \times \bar{K} \\
 E_V &= \frac{P \times t}{L \times g \times \bar{K}} = \frac{E_l}{g \times \bar{K}} = \frac{E_l}{S_k} = \frac{E_s}{\bar{K}}
 \end{aligned}
 \tag{4.41}$$

în care E_V - Energie specifică volumului [J/mm^3]; V - Volumul de material topit [mm^3]; S_k - Aria secțiunii transversale a tăieturii [mm^2]; \bar{K} - Lățimea medie a tăieturii [mm].

Evident, primul criteriu se pretează la a fi aplicat în cazul pieselor cu grosime mică, unde mai relevantă este lungimea conturului, decât grosimea piesei. De altfel, aria laterală a piesei depinde atât de lungimea conturului, cât și de grosime, dar în proporții mult diferite. Deci, al doilea criteriu, se potrivește mai bine pieselor cu grosime relativ mare. Al treilea criteriu este mai potrivit pentru prelucrările la care rezultă un Kerf mare, ceea ce implică un volum mare de material care ar trebui să fie topit. Este clar că acești indicatori trebuie utilizați cu discernământ, astfel încât să se plieze cât mai bine pe cazul concret de prelucrare. Comparând diverse prelucrări prin intermediul indicatorilor propuși se poate aprecia în ce măsură un anumit proces este eficient. În plus, ținând seamă că prin consumul de energie se produce un impact negativ asupra mediului, se poate aprecia și în ce măsură un anumit proces este *Eco-friendly* [GÎR19a].

4.7 Concluzii

Pe baza cercetărilor teoretice asupra tăierii oțelurilor HARDOX cu laserul se pot formula următoarele concluzii:

1. densitatea de energie a radiației în regim de emisie laser crește o dată cu presiunea gazului din tubul laser;
2. densitatea de energie a radiației e direct proporțională cu numărul de fotoni și invers proporțională cu numărului de molecule CO_2 . Din modelul matematic rezultă totuși că această mărire este atenuată de raportul dintre populațiile de electroni N_i ale nivelului laser inferior și N_j ale nivelului superior de pe care are loc emisia stimulată;
3. la interacțiunea fasciculului laser cu materialul metalic o serie de factori fizici contribuie la producerea unui curent electric prin material. Aceștia sunt stimularea electronilor din material de către laser și câmpul electromagnetic variabil al laserului. Curentul electric astfel produs se transformă prin efect Joule în căldură. Aceasta contribuie suplimentar la topirea materialului;
4. materialele metalice cu permitivitate electrică relativă mică cum ar fi Cu, Al necesită pentru a fi tăiate o cantitate mai mare de energie decât cele cu permitivitate electrică mare (de exemplu oțelurile);
5. la materialele metalice câmpul electric produs de radiația laser induce și un câmp magnetic. Acesta este cu atât mai intens cu cât permeabilitatea magnetică relativă a materialului este mai ridicată. Din considerente care au fost deja menționate mai sus se poate concluziona că materialele cu permeabilitate magnetică mare necesită o cantitate de energie laser mai mică pentru a fi tăiate (oțelurile);
6. influența grosimii piesei (g) asupra energiei specifice E_s , arată că acest indicator devine mai util atunci când se compară din punct de vedere al eficienței de tăiere piesele realizate din materiale diferite și având grosimi diferite;
7. este important să se selecteze corect indicatorul utilizat pentru aprecierea unui anumit caz (set de eşantioane piese), în funcție de datele variabile de intrare, care pot fi controlate. Trebuie să se țină cont de faptul că, în anumite cazuri, unele date de intrare ar putea fi fixe, acestea neputând fi modificate (de exemplu, materialul sau grosimea piesei);

8. relațiile de calcul prezentate, confirmate de datele experimentale, indică faptul, că în general, o eficiență bună se obține când se lucrează cu putere mică și viteză de tăiere mare. Totuși, această regulă generală nu poate fi aplicată în toate cazurile, deoarece există anumite limitări tehnologice: unele materiale necesită o putere relativ mare pentru a putea fi tăiate, iar viteza de tăiere e limitată de proprietățile materialului prelucrat și de grosimea sa [GÎR22];
9. spre deosebire de abordările altor autori, [SAH11], [AHN16], [GYO17], [LEE18], care tratează punctual cazuri particulare, modul propus pentru aprecierea eficienței energetice la tăierea cu laserul permite o tratare coerentă, aplicabilă indiferent de condițiile concrete de lucru și proprietățile materialului, cu condiția alegerii corecte a indicelui specific utilizat;
10. intensitatea luminoasă a laserului este direct proporțională cu pătratul intensității câmpului electric al radiației electromagnetice. Acest lucru este demonstrat analitic de către autor.

CAPITOLUL 5 Cercetări experimentale privind rugozitatea, duritatea, lățimea de tăiere și înclinarea suprafețelor pieselor fabricate prin tăiere cu laserul

5.1 Material și metodă

Principalele activități de cercetare sunt detaliate mai jos:

1. selectarea materialelor în vederea efectuării cercetărilor experimentale;
2. proiectarea experimentelor;
3. realizarea experimentelor de tăiere planificate;
4. efectuarea măsurărilor asupra pieselor și semifabricatelor din oțel;
5. prelucrarea datelor obținute din măsurători;
6. identificarea rezultatelor importante referitoare la rugozitate Ra, duritate Ha și lățime de tăiere Kerf.
7. Interpretarea rezultatelor obținute prin modelul predictiv liniar și pătratic, precum și cu cel al modelului matematic de regresie, diferențele și concordanța dintre modelele obținute;
8. analiza statistică, analiză grafică, grupare tabelară și stabilirea parametrilor de influență;
9. identificarea combinației recomandate pentru factorii de influență în vederea controlului răspunsurilor rugozitate Ra, duritate și Kerf;
10. formularea concluziilor privind influența parametrilor de intrare asupra rugozității, durității și lățimii fantei de tăiere;
11. formularea concluziilor generale asupra rezultatelor cercetării experimentale.

Tăierea cu laserul este o metoda de fabricație care păstrează microstructura internă a pieselor confecționate [LEP17]. În procesele de prelucrare a pieselor cu laserul se va ține cont de energia radiațiilor laser ce este absorbită de către metal și convertită în căldură, care produce transformări de fază ale zonei locale de penetrare, cu modificări ale structurii metalografice [THO14]. Prin măsurători de analiză spectrală se poate constata dacă există modificări ale compoziției chimice a zonei prelucrate.

5.2 Proiectarea experimentelor

În cadrul cercetărilor efectuate asupra tăierii cu laserul [MAD20], planurile experimentale au fost elaborate utilizând diverse metode: **factorial complet** pentru studiul comportării materialului HARDOX400 cu grosimea $g=8$ mm, **factorial fracționat** pentru studiul materialului HARDOX400 cu grosimea $g=10$ mm și H450 cu grosimea $g=12$ mm.

Planul factorial complet conține un număr de experimente determinate de a considera că fiecare nivel al unui factor interacționează cu fiecare nivel al celorlalți factori ai experimentului. Numărul de combinații este egal cu 2^k , 3^k , unde 2 respectiv 3 reprezintă nivelurile de intrare, iar k – numărul de parametri de intrare ai laserului sau factorii de influență. Planul factorial complet utilizat în experimentele de tăiere are 27 de instanțe. Simplu, s-au folosit trei parametri de intrare, fiecare cu câte trei niveluri. La fiecare încercare, parametrii de intrare se modifică. Proiectul Box-Wilson descrie planul factorial complet care rulează cu toți parametrii de intrare la fiecare nivel. Planul factorial complet furnizează rezultate mai apropiate de realitate.

Planul factorial fracționat este o metodă redusă de planificare a experimentelor. S-a introdus această metodă alcătuită dintr-un număr redus de încercări. Astfel, el a redus planul factorial complet 3^3 cu 27 de experimente la un plan factorial fracționat echilibrat $3^{3-1}=9$ încercări. Proiectarea redusă dezvoltă o matrice cu nivelul factorilor distribuiți egal ca pondere față de punctul central. În scopul economisirii de material, timp, energie se optează pentru un plan factorial fracționat care furnizează rezultate concludente, veridice, dar mai puțin fidele decât planul factorial complet.

5.4 Selectarea planului experimental adecvat cercetării

Cunoscând modul în care predictorii influențează duritatea se pot alege valori ale acestora care să conducă la valori mai mici sau mai mari ale durității, conform specificațiilor de pe desenul piesei, sau necesitățile privind exploatarea pieselor. Rezultate bune privind răspunsul se obțin cu ajutorul planului fracționat, dar depinde ce se urmărește și care sunt resursele disponibile. În cazul experimentului privind analiza durității s-au optat ca parametri de tăiere să ruleze în timp la 3 niveluri de intrare în conformitate cu tabelul 5.10:

Tab. 5.10 *Parametrii de intrare în cazul semifabricatului HARDOX450*

Experiment Ha	NIVELUL		
	Minim	Mediu	Maxim
Puterea laser [W]	3700	3800	3900
Viteza de tăiere [mm/min]	1250	1450	1650
Presiunea gazului [bar]	0,55	0,65	0,75

Tabelul 5.11 *Parametrii de intrare în cazul semifabricatului HARDOX400, grosime 10 mm*

Experiment Ra	NIVELUL		
	Minim	Mediu	Maxim
Puterea laser [W]	4100	4200	4300
Viteza de tăiere [mm/min]	1200	1400	1600
Presiunea gazului [bar]	0,35	0,45	0,55

Selectarea parametrilor centrali s-a obținut prin teste pe piese de probă. Nivelurile parametrilor de intrare au fost alese în baza experienței practice acumulate în timp, a specificațiilor tehnice de fabrică, precum și a rezultatelor unui experiment de selecție realizat în prealabil, în demersul verificării reglajelor mașinii, a mentenanței. Experimentul are 5 replicări, numărul de piese a crescut la un total de 45 de piese experimentale ce vor fi supuse unor măsurători pentru investigarea rezultatelor obținute la tăierea cu laserul.

Tabelul 5.12 *Parametrii de intrare în cazul semifabricatului HARDOX400, grosime 8 mm*

Experiment full Kerf	NIVELUL		
	Minim	Mediu	Maxim
Puterea laser [W]	4900	5000	5100
Viteza de tăiere [mm/min]	1700	1800	1900
Presiunea gazului [bar]	0,45	0,50	0,55

5.6 Infrastructura de cercetare

Infrastructura de cercetare utilizată pentru dezvoltarea cercetării științifice a constat din hardware și resurse software. Ca echipamente de prelucrare au fost utilizate mașinile ByAutonom 3015, figura 5.22, BY Speed 3015, figura 5.23 și ByAutonome 4020, figura 5.24.

Toate cele trei mașini au caracteristici tehnice apropiate, sunt fabricate de același producător și au fost selectate în funcție de disponibilitatea companiei care a oferit sprijin tehnic pentru efectuarea prelucrărilor de probă și a celor planificate în scopul cercetării științifice.

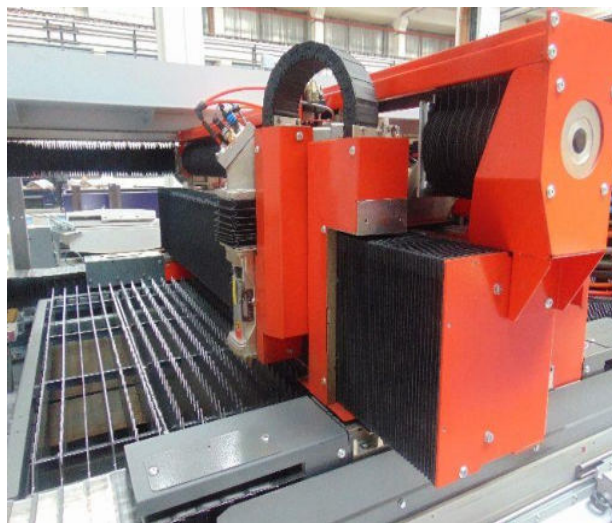


Fig. 5.22 Instalație laser ByAutonom 3015 (a) mașina, (b) Tubul laser pentru amplificarea lumii



Fig. 5.23 Instalația laser BYspeed 3015



Fig. 5.24 Instalația laser ByAutonome 4020

Pentru evaluarea rezultatelor prelucrărilor prin tăiere cu laserul au fost efectuate măsurări ale valorilor caracteristicilor urmărite [GÎR19b]. Aparatura utilizată pentru efectuarea măsurărilor a constat în următoarele:

Șubler digital: producător VOREL BYTOYA 15240. Este un instrument de măsurare cu deschiderea de 0-150 mm, cu precizia de măsurare $\pm 0,03$ mm. Are prevăzute două sisteme de măsurare a dimensiunii în mm și în inch. Rezultatul măsurării este afișat pe un ecran LCD. La fiecare operație de măsurare se efectuează calibrarea șublerului la 0 mm. Vernierul șublerului este gradat de la 0 la 150 mm. Cu ajutorul brațelor din inox se efectuează fixarea poziției ce trebuie măsurate, de exemplu diametrul unei găuri sau rostul de tăiere dintre piesă și placă.

Micrometrul Electronic Digital Micrometer este un instrument care redă datele măsurate în mm sau inch. Poate măsura dimensiuni între 0-25 mm cu o precizie de 0,001 mm. Are în dotare ecran LCD, buton de calibrare. Se poate conecta la un calculator cu un cablu de date. Poate căuta valoarea maximă, minimă și o memora.

Durimetrul KrautKramer MIC 2V 050 33899 a fost utilizat pentru a determina duritatea Brinell, HRC de pe suprafața tăiată cu laserul, de lângă marginea tăiată sau din centrul piesei. Instrumentul este folosit pentru măsurarea durității pe piesele din oțel HARDOX. Duritatea este proprietatea unui metal de a se opune distrugerii stratului superficial creat în urma tăierii cu laser a suprafețelor. Sonda durimetrului acționează pe o suprafață foarte mică exercitând o presiune locală. Aceasta

amprentează materialul piesei prelucrate. În capul durimetrului se află o bilă de oțel care lovește cu o anumită viteză suprafața piesei exercitând o forță pentru testare. La fiecare măsurare se calibrează durimetrul cu o piesă etalon. Valoarea unei măsurători înregistrate s-a calculat ca media aritmetică a 3 măsurători succesive indicate de ecranul digital. Testarea pieselor s-a realizat static pentru a evalua proprietățile mecanice ale stratului pelicular supus tracțiunii și compresiei sondei.

Rugozimetru Mytutoyo – SJ 201 Cu ajutorul rugozimetrului Mitutoyo SJ 301s-au măsurat în laboratorul UCB rugozitatea pe suprafața de tăiere a pieselor din HARDOX. Rugozitățile măsurate: Ra – abaterea medie a rugozității, Rz – adâncimea medie a 10 puncte a rugozității și rugozitatea Rq. S-au efectuat măsurători pe un contur rectiliniu tăiat termic cu laserul cu ajutorul unui palpator cu vârf de diamant pe una din fețele tăiate ale piesei. Instrumentul posedă o imprimantă pentru tipărirea datelor. Viteza de măsurare 0,25-0,5mm/s. Domeniu de măsurare pe axa Y până la 150 μm [MIL20].

Microscop OLYMPUS- MICROSCOP MODEL TIP BX51. Microscopul este prevăzut cu cameră și software integrat pentru investigații în domeniul biologic, petrografie, metalografie, producător Olympus. Microscopul este prevăzut cu două oculare. Obiectivele ce pot fi utilizate sunt de tip UPLFLN-P unde se poate selecta Obiectiv 4 x NA 0,13 cu distanța de lucru 17 mm, 10 mm, 2,1 mm. Mărirea porțiunii studiate de microscop este de x200. Microscopul e utilizat la determinarea structurii metalografice a piesei tratate. Se poate observa ferita, perlita, cementita.

Microscop digital CELESTRON: Instrumentul portabil este utilizat pentru inspecția suprafețelor din HARDOX tăiate cu laserul, a găurilor realizate în regim de piercing staționar. Este prevăzut cu un sistem de mărire x30-lentile microscopice, ecran LCD, ocular, Led de intensitate reglabilă, cu conectare la calculator.

Spectrometru XRF OLYMPUS Element: OLYMPUS este un dispozitiv portabil care emite raze X cu ajutorul unui tub. Radiațiile X de energie înaltă interacționează cu proba, care stălucește (neobservabil) și emite un flux de radiații X-secundar către analizator. Spectrul de emisie al probei este afișat pe ecranul dispozitivului. Pe baza energiei electronilor se poate identifica prezența fiecărui element din compoziția chimică a materialului. fiecărui element.

Spectrometru X-MET 3000TX+: Spectroscopia cu raze X de dispersie energetică este o tehnică folosită pentru identificarea elementelor dintr-o piesă. Se bazează pe interacțiunea razelor X cu materialul, excitație, producerea radiațiilor X-caracteristice și analiza spectrală de emisie cu ajutorul unui analizator pentru caracterizarea chimică a probei. Stratul examinat este de ordinul zecilor de microni.

PHASEC 3D este un detector pentru observarea defectelor suprafețelor afectate de laser cu ajutorul unei sonde. Prin mișcarea sondei pe suprafața tăiată se poate observa pe un ecran un marcaj verde sau roșu ce confirmă lipsa/apariția fisurilor și coroziunii în piesă. Detectorul folosește curenții turbionari de frecvență joasă care prin inspecție de suprafață poate identifica un posibil defect.

LERA UNIOR 701 produsă conform standardului DIN 2275, producător UNIOR TOOLS. Pentru măsurarea fantei la profilul drept s-a folosit ca instrument Lera – calibrul –marca UNIOR 701. Gama de dimensiuni de la 0.05 mm la 1.00 mm, sculă etalonată pentru determinarea dimensiunilor interioare (jocuri de lagăre, bile de rulmenți, fante, etc) de înaltă precizie. Pentru determinarea rostului de tăiere cu laserul se poziționează lama din oțel inoxidabil în interiorul fantei profilului rectiliniu și se verifică lera cea mai apropiată prin tatonare, principiul trece - nu trece. Gradul de precizie al măsurătorii este de 0.001mm. Lera are multe lame din oțel pentru a măsura tăietura prin material, fiind un instrument care asigură precizie și calitate certificate conform standardelor.

5.7 Desfășurarea cercetării experimentale

După selectarea materialelor pentru cercetarea științifică și a planurilor experimentale s-a trecut la prelucrarea propriu-zisă a pieselor de probă. În acest scop au fost parcurse următoarele etape, indiferent de materialul prelucrat și echipamentul utilizat:

1. pregătirea semifabricatului pentru prelucrare: examinarea lui, verificarea grosimii plăcii, curățarea de oxizi sau alte substanțe străine;
2. instalarea pe masa mașinii a semifabricatului. Au fost utilizate în acest scop bride si/sau sistem de fixare magnetic;

3. introducerea datelor conform schiței cu dispunerea pieselor care urmează să fie tăiate;
4. setarea nului (referinței piesei);
5. verificarea instalației de răcire;
6. efectuarea prelucrărilor de probă în vederea stabilirii punctului central pentru fiecare din parametri de lucru variați: puterea laserului, viteza de avans și presiunea gazului asistent [PAT21]. Inițial s-au programat valori ale acestora conform experienței de producție și recomandărilor făcute de softul mașinii pentru materiale din categoria oțelurilor dure. Pornind de la valorile astfel alese, acestea au fost modificate (creștere și descreștere) pentru a observa vizual, grosier efectul. Pe piesele astfel realizate s-au făcut măsurări ale rugozității și durtității. Valorile parametrilor de intrare pentru care s-au constatat cele mai bune rezultate au fost adoptate ca valori centrale. S-a continuat creșterea/reducerea valorilor de intrare, până când rezultatele au devenit nesatisfăcătoare, pentru a determina extremele (nivelul minim, respectiv maxim) pentru valorile parametrilor de intrare.
7. efectuarea prelucrărilor conform planului experimental selectat în prealabil;
8. măsurarea valorilor mărimilor de ieșire studiate, rugozitatea și duritatea pe flancurile prelucrate și lățimea tăieturii (rostul de tăiere, kerf);
9. prelucrarea datelor experimentale;
10. interpretarea rezultatelor;
11. formularea concluziilor.

5.8 Prelucrarea datelor experimentale

Piesele prelucrate pentru cercetarea experimentală au fost apreciate din punctul de vedere a trei parametri de ieșire (rezultate): duritatea și rugozitatea pe suprafețele obținute prin tăiere cu laserul și lățimea rostului de tăiere – kerf cum este cunoscut în literatura de specialitate. Pe lângă aceste măsurători s-au mai efectuat și observații asupra microstructurii materialului pieselor în zona prelucrată cu laserul, microduritatea în zonele învecinate suprafețelor prelucrate. Pentru toate piesele prelucrate, indiferent de material, grosimea semifabricatului, sau echipamentul pe care s-a făcut prelucrarea, a fost utilizată aceeași aparatură de măsură, conform capitolului *Infrastructura de cercetare*. Rezultatele obținute se prezintă separat pentru cele două materiale studiate.

Prin analiza defectoscopică nu s-au detectat fisuri pe suprafețele tăiate cu laserul. S-a determinat și compoziția chimică a stratului superficial prelucrat pentru a identifica eventualele modificări induse de prelucrarea cu laserul.

5.8.1 Oțel HARDOX400 cu grosimea de 10 mm

5.8.1.1 Influența parametrilor de tăiere asupra durtității suprafeței

Variația durtității în funcție de puterea laserului și presiunea gazului asistent

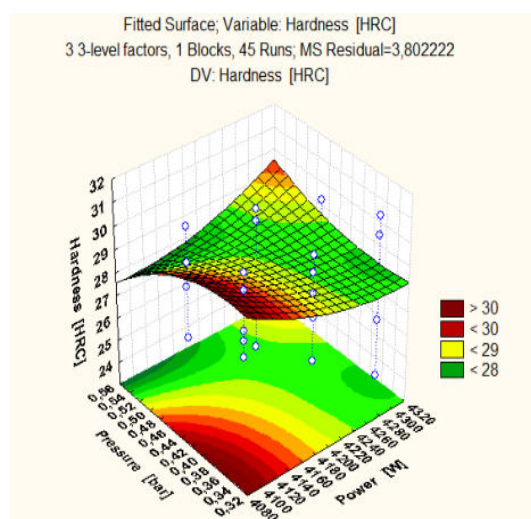


Fig. 5.49 Modelul pătratic previzionat $H_a(P,p)$

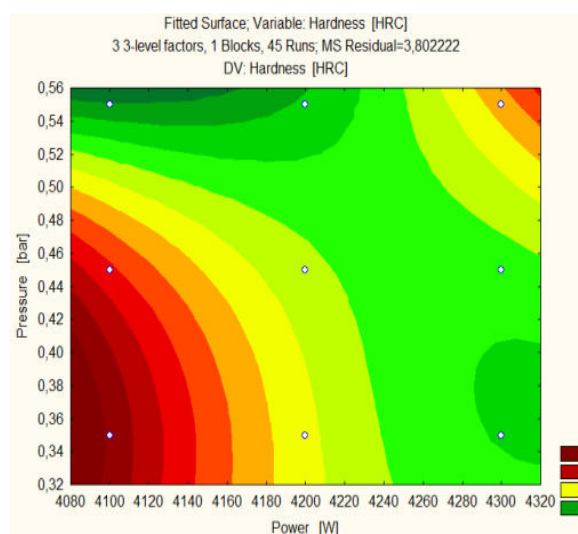


Fig. 5.50 Grafic contur previzionat $H_a(P,p)$

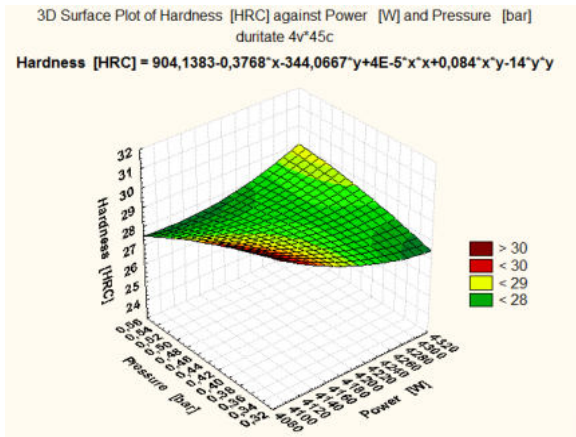


Fig. 5.51 Modelul regresiei pătratice $Ha(P,p)$

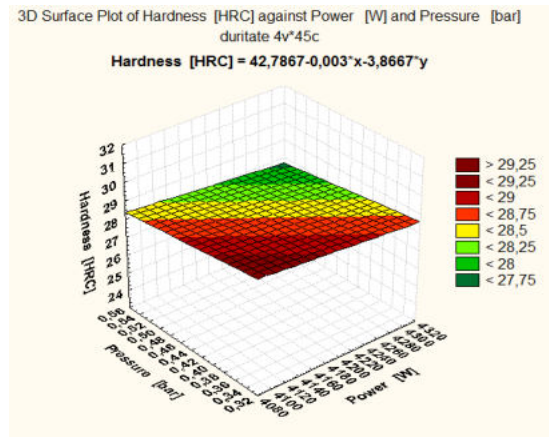


Fig. 5.52 Modelul regresiei liniare $Ha(P,p)$

Variația durtății în funcție de presiunea gazului asistent și viteza de tăiere

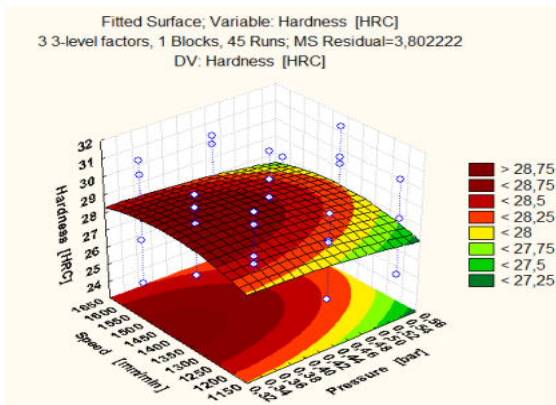


Fig. 5.53 Modelul pătratic anticipat $Ha(p,v)$

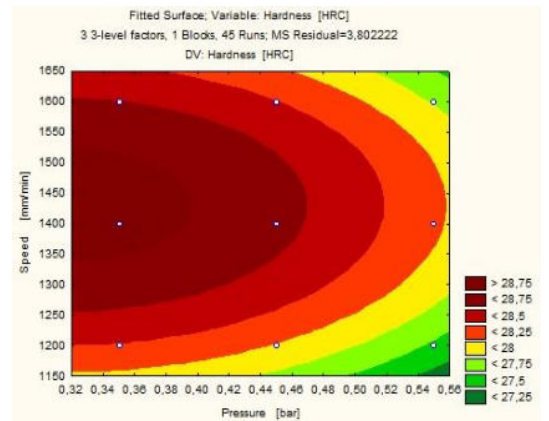


Fig. 5.54 Graficul contur previzionat $Ha(p,v)$

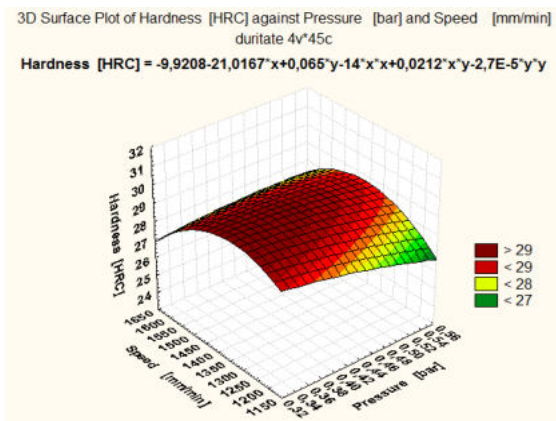


Fig. 5.55 Modelul regresiei pătratice $Ha(p,v)$

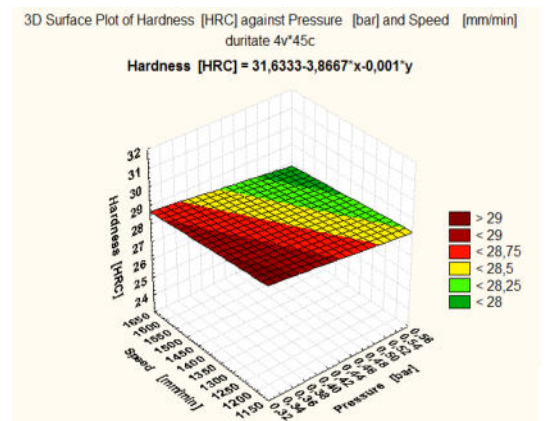


Fig. 5.56 Modelul regresiei liniare $Ha(p,v)$

Variația durtății în funcție de puterea laserului și viteza de tăiere

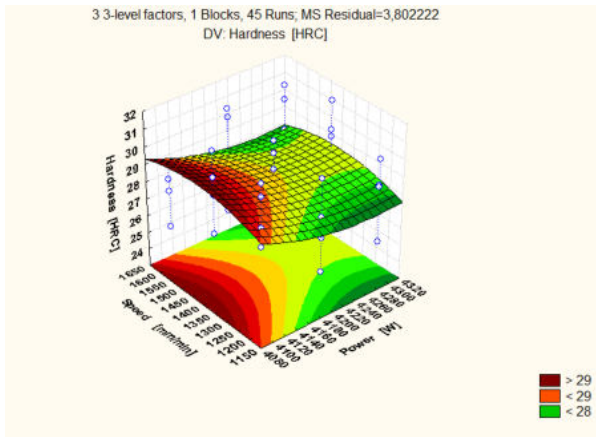


Fig. 5.57 Modelul pătratic previzionat $Ha(P,v)$

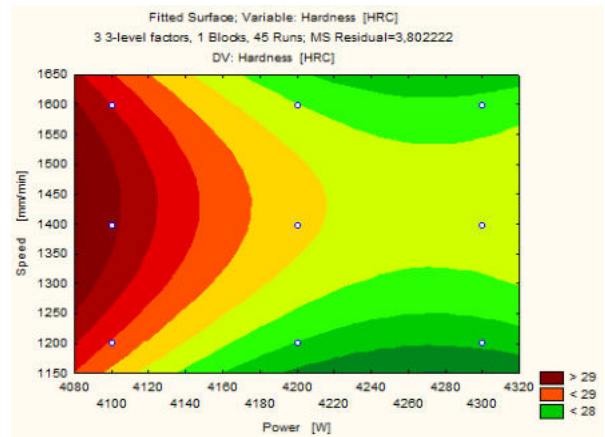


Fig. 5.58 Graficul contur previzionat $Ha(P,v)$

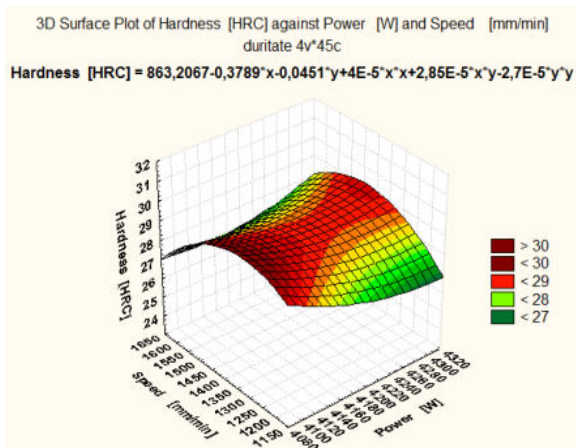


Fig. 5.59 Modelul regresiei pătratice $Ha(P,v)$

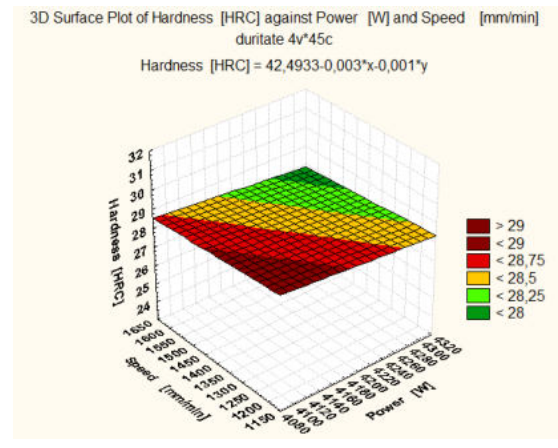


Fig. 5.60 Modelul regresiei liniare $Ha(P,v)$

5.8.1.2 Influența parametrilor de tăiere asupra rugozității suprafeței [COR21]

Modelul matematic liniar și pătratic al rugozității Ra presiune-viteză:

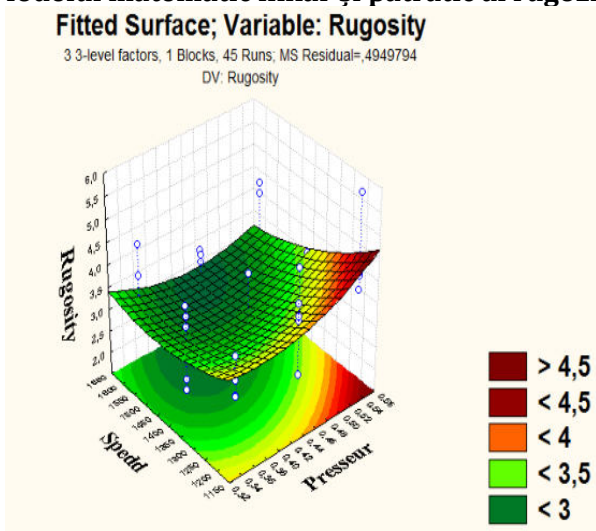


Fig. 5.64 Modelul predicției pătratice

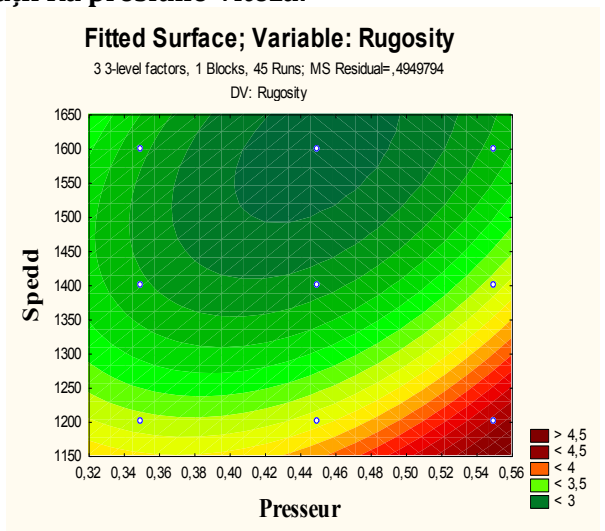


Fig. 5.65 Grafic de contur predicție

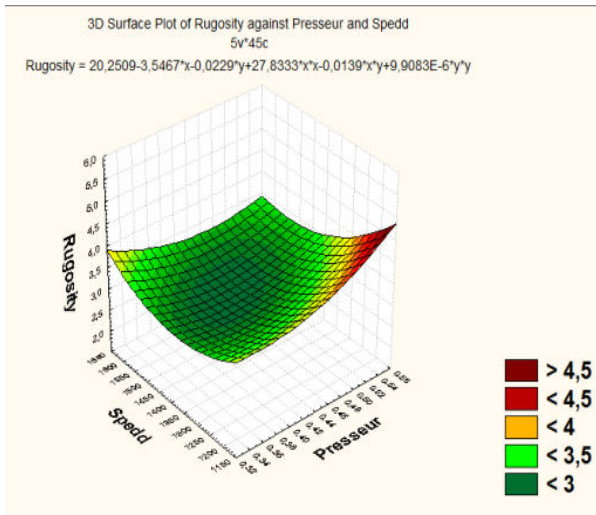


Fig. 5.66 Modelul regresiei pătratic

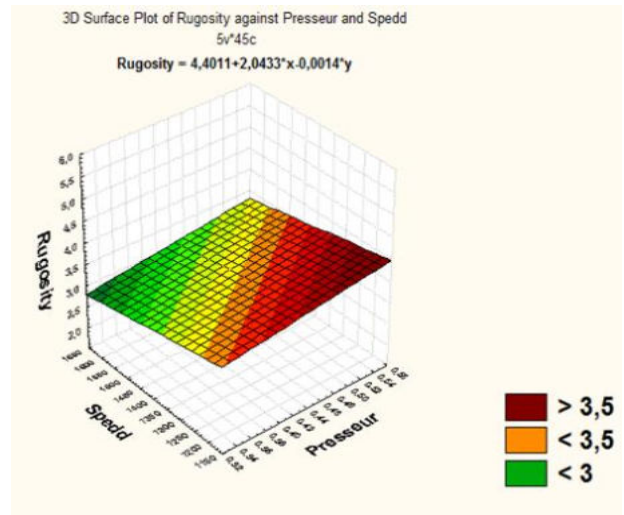


Fig. 5.67 Modelul regresiei liniare

Modelul matematic liniar și pătratic viteza de tăiere-puterea laserului: [GÎR21b]

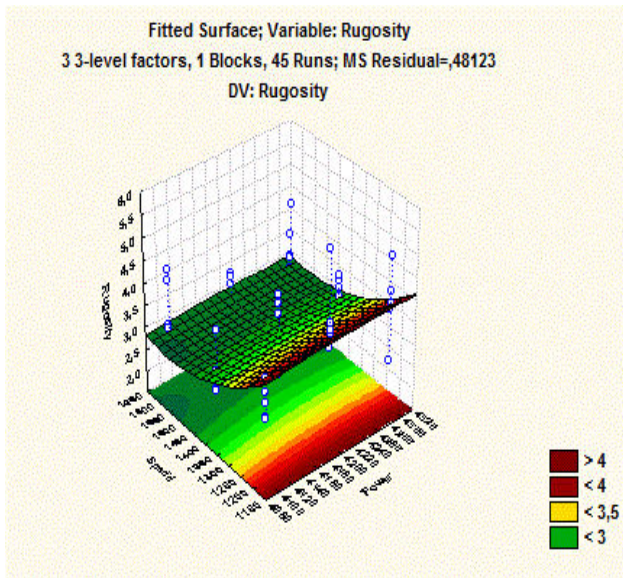


Fig. 5.68 Grafic RSM pentru predicția (Q) Ra

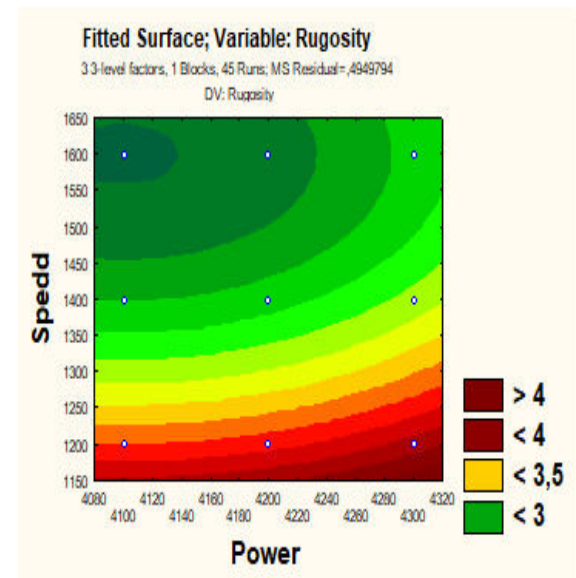


Fig. 5.69 Grafic contur pentru predicția Ra

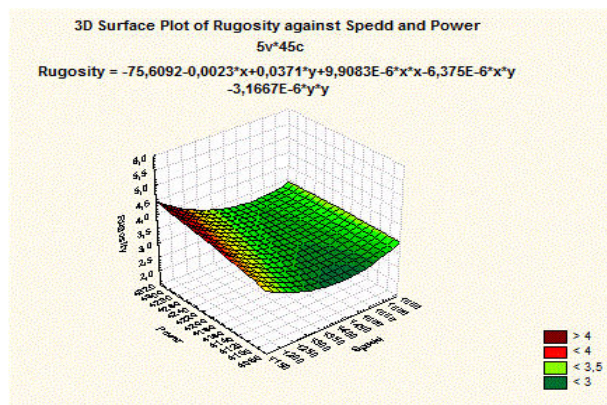


Fig. 5.70 Grafic RSM pentru regresia (Q) Ra

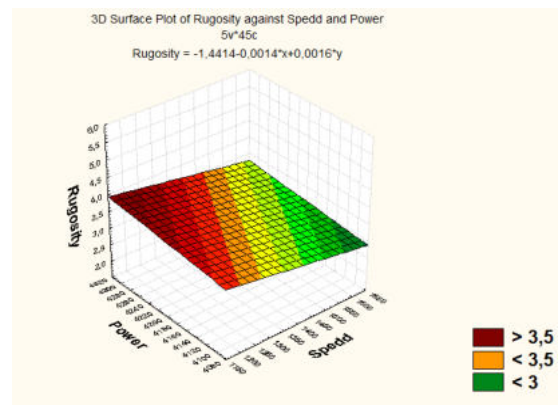


Fig. 5.71 Grafic RSM pentru regresia (L) Ra

Modelul matematic liniar și pătratic al rugozității Ra putere-presiune:

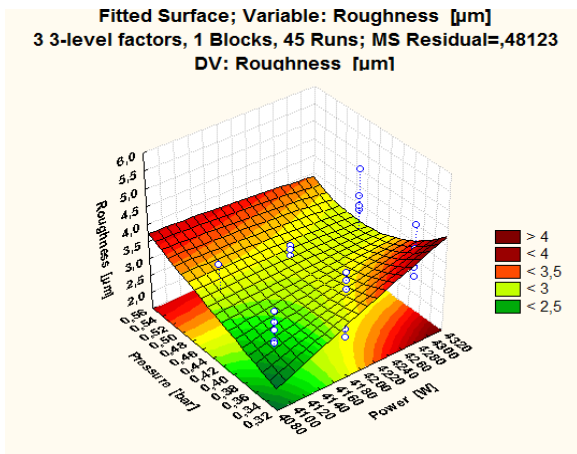


Fig. 5.72 Graficul predictiv pătratic Ra(P,p)

3D Surface Plot of Roughness [µm] against Power [W] and Pressure [bar]
 Rugosity, decimal point 5v'45c
 $Roughness [\mu m] = -71,2875 + 0,0322 * x + 13,9533 * y - 3,1667E-6 * x^2 - 0,0088 * x * y + 27,8333 * y^2$

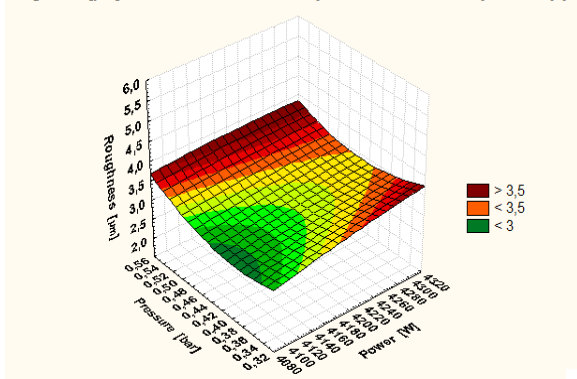


Fig. 5.74 Graficul de regresie Ra (P,p)-Q

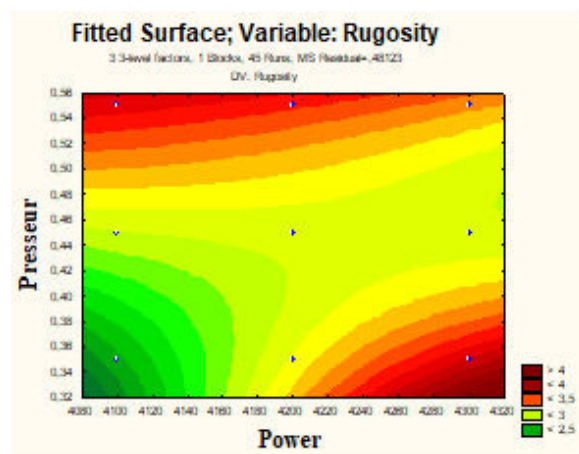


Fig. 5.73 Graficul contur predictiv Ra(P,p)

3D Surface Plot of Rugosity against Power and Pressur
 $Rugosity = -4,2673 + 0,0016 * x + 2,0433 * y$

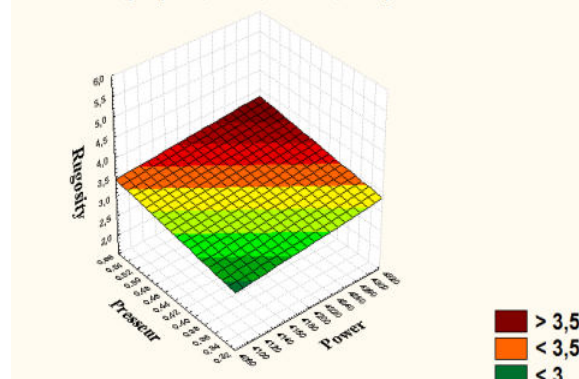


Fig. 5.75 Graficul de regresie Ra (P,p)-L

5.8.1.3 Influența parametrilor de tăiere asupra lățimii de tăiere

Influența cuplului de parametri presiune-putere asupra lățimii rostului de tăiere

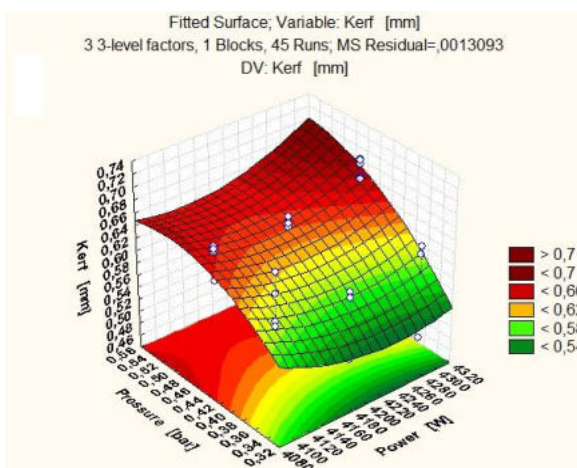


Fig. 5.79 Modelul predicției pătratic Kerf (P,p)

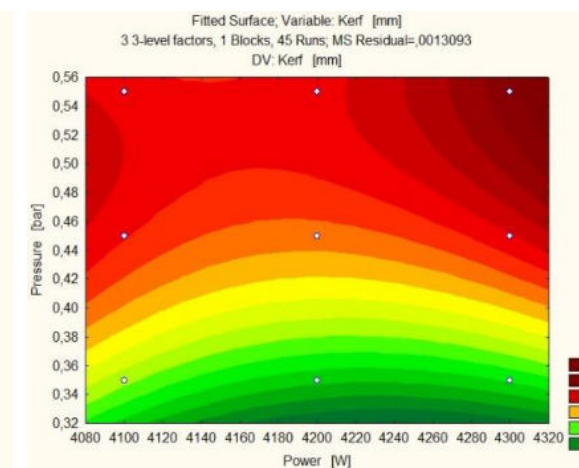


Fig. 5.80 Graficul predicției putere-presiune

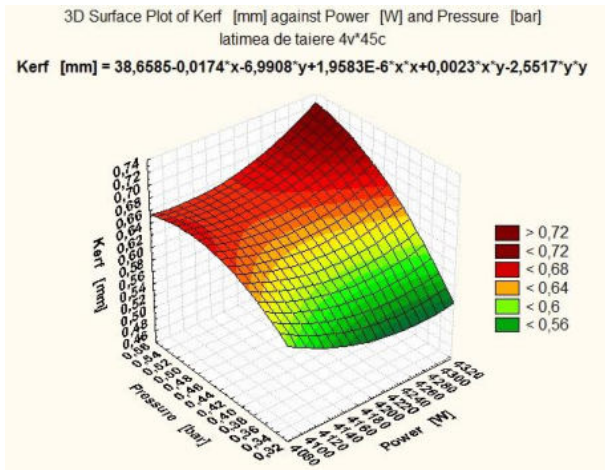


Fig. 5.81 Graficul regresiei pătratice Kerf(P,p)

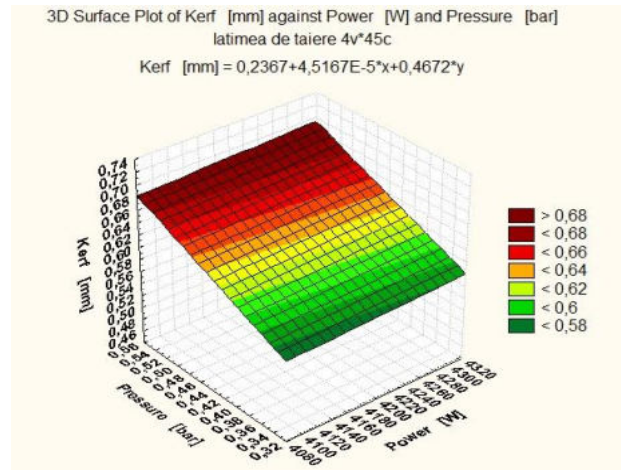


Fig. 5.82 Graficul regresiei liniare putere-presiune

Influența cuplului de parametri presiune-viteză asupra lățimii rostului de tăiere

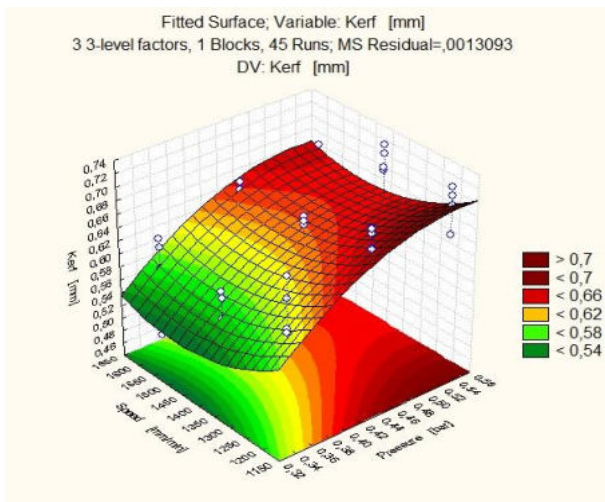


Fig. 5.83 Modelul predicției pătratice Kerf(p,v)

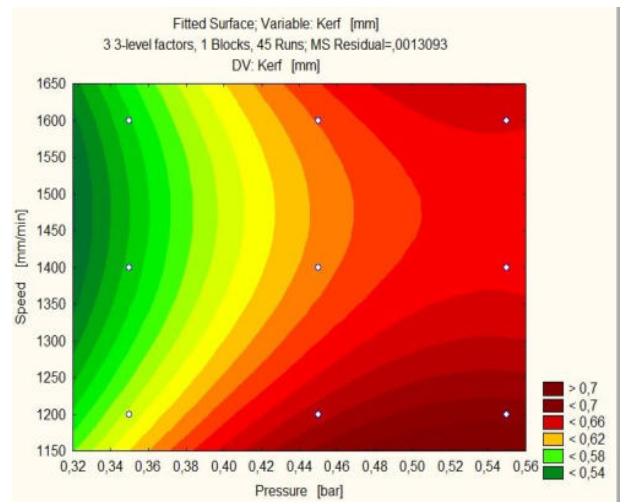


Fig. 5.84 Graficul predicției Kerf(p,v)

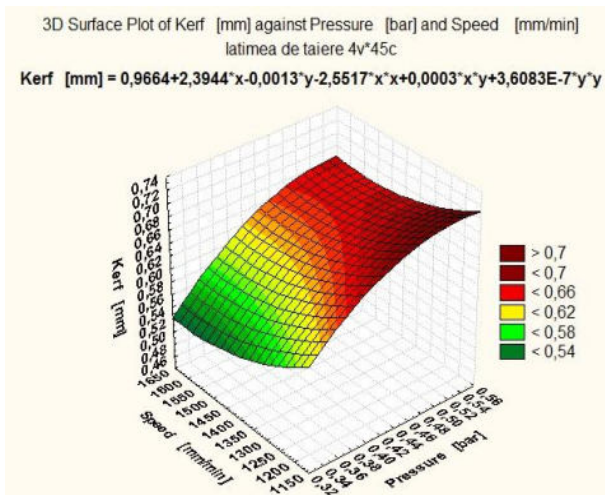


Fig. 5.85 Graficul regresiei pătratice Kerf(p,v)

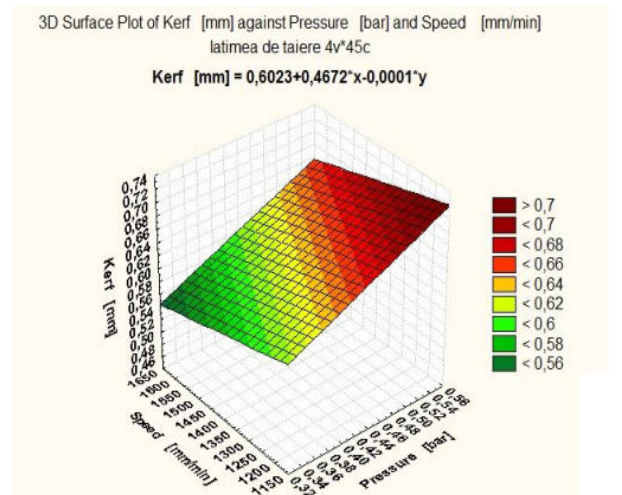


Fig. 5.86 Graficul regresiei liniare Kerf(p,v)

Influența cuplului de parametri putere-viteză asupra lățimii rostului de tăiere

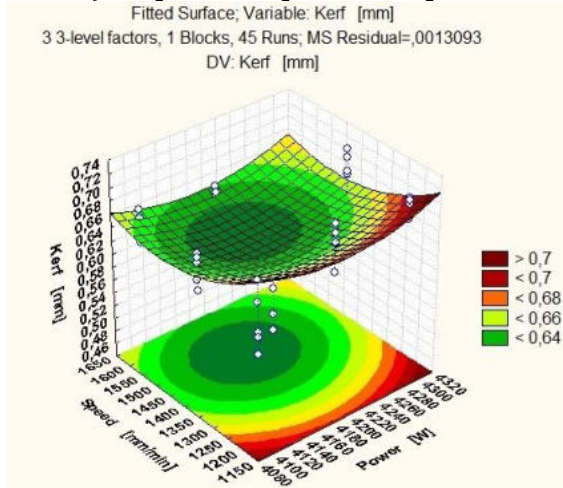


Fig. 5.87 Modelul predicției pătratic Kerf(P,v)

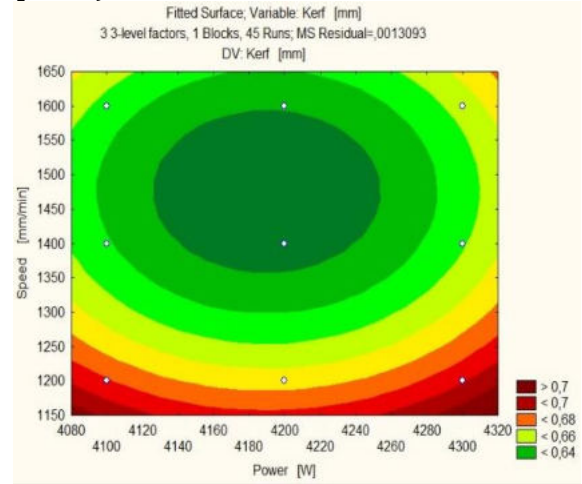


Fig. 5.88 Graficul predicției Kerf(P,v)

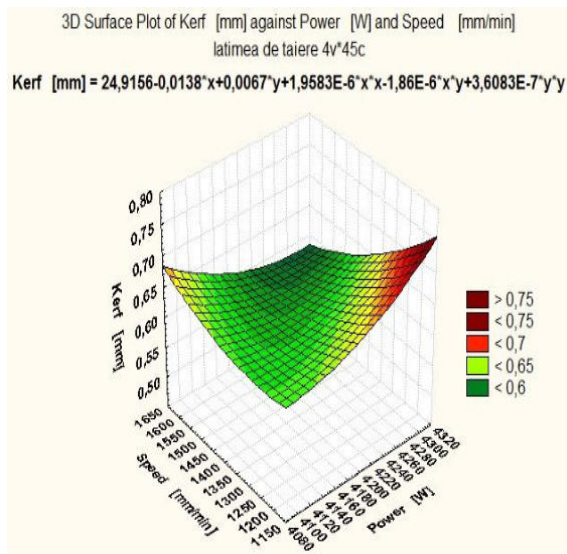


Fig. 5.89 Graficul regresiei pătratic Kerf(Pv)

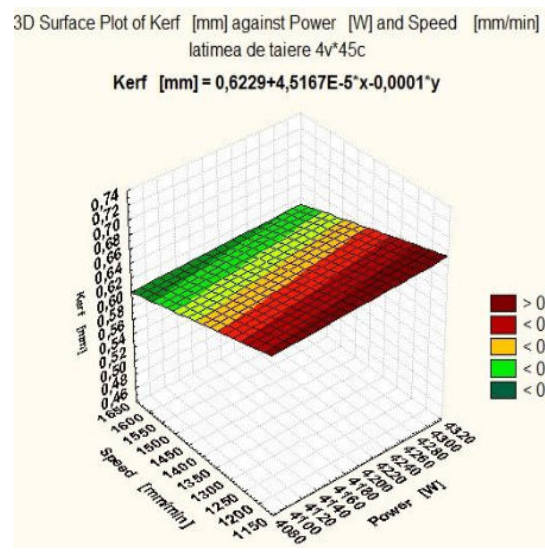


Fig. 5.90 Graficul regresiei liniare Kerf(P,v)

Pe baza datelor experimentale au fost determinate următoarele relații matematice care descriu dependența durtății, rugozității și lățimii rostului de tăiere de parametrii regimului de tăiere:

$$Ha = 42,7867 - 0,003 * P - 3,8667 * p \quad (5.5)$$

$$Ha = 904,1383 - 0,3768 * P - 344,0667 * p + 4 * 10^{-5} * P^2 + 0,084 * P * p - 14 * p^2 \quad (5.6)$$

$$Ha = 31,6333 - 3,867p - 0,001v \quad (5.7)$$

$$Ha = -9,9208 - 21,0167p + 0,065v - 14p^2 + 0,0212pv - 0,000027v^2 \quad (5.8)$$

$$Ha = 42,4933 - 0,003 * P - 0,001 * v \quad (5.9)$$

$$Ha = 863,2067 - 0,3789P - 0,0451v + 0,00004P^2 + 0,0000285P * v - 0,000027v^2 \quad (5.10)$$

$$Ra = 4,4011 + 2,0433 p - 0,0014v \quad (5.11)$$

$$Ra = 20,2509 - 3,547p - 0,0229v + 27,8333p^2 - 0,0139vp + 0,0000099v^2 \quad (5.12)$$

$$Ra = -1,4414 - 0,0014 v + 0,0016P \quad (5.13)$$

$$Ra = -75,6092 - 0,0023 v + 0,0371P + 0,0000099v^2 - 0,00000637vP - 0,00000316P^2 \quad (5.14)$$

$$Ra = -4,2673 + 0,0016 P + 2,0433p \quad (5.15)$$

$$Ra = -71,2875 + 0,0322P + 13,9533p - 0,0000031667P^2 - 0,0088p * P + 27,8333p^2 \quad (5.16)$$

$$Kerf = 0,2367 + 0,00004516P + 0,4672p \quad (5.17)$$

$$Kerf = 38,6585 - 0,0174P - 6,9908p + 0,0000019583P^2 + 0,0023Pp - 2,5517p^2 \quad (5.18)$$

$$Kerf = 0,6023 + 0,4672p - 0,0001v \quad (5.19)$$

$$Kerf = 0,9664 + 2,3944p - 0,0013v - 2,5517p^2 + 0,0003pv - 0,00000036083v^2 \quad (5.20)$$

$$Kerf = 0,6229 + 0,00004516P - 0,0001v \quad (5.21)$$

$$Kerf = 024,9156 - 0,0138P + 0,0067v + 0,0000019583P^2 - 0,00000186Pv + 0,00000036083v^2 \quad (5.22)$$

În urma celor prezentate în acest subcapitol se pot formula o serie de concluzii care pot fi utile pentru cercetare și practica de producție:

1. din analiza modelului de predicție și a modelului matematic se constată că presiunea gazului de tăiere este factorul cel mai influent;
2. pentru practica industrială se va alege presiunea minimă 0,35 bar cu viteza maximă 1600 mm/min la putere moderată de 4200 W;
3. utilizând relațiile matematice determinate se poate estima valoarea Kerf pentru o anumită combinație de valori a doi parametri de intrare, în timp ce al treilea e considerat la valoarea medie.
4. valoarea lățimii rostului de tăiere are o semnificație aparte la tăierea cu laserul deoarece această valoare e implicată direct în programarea traiectoriei sculei. Jumătatea lățimii rostului de tăiere este utilizată pentru compensarea razei sculei. Se cuvine mențiunea importanta că aceasta ar trebui să fie compensarea razei sculei, și nu raza fasciculului laser:
5. atunci când precizia dimensională a piesei și cea de formă a conturului sunt criteriile principale, trebuie acordată o atenție deosebită lățimii rostului de tăiere, și deci factorilor care îl influențează.
6. presiunea gazului asistent și combinația putere laser-presiune au o influență semnificativă asupra lățimii de tăiere

5.8.2 Oțel HARDOX400 cu grosimea de 8 mm

5.8.2.1 Influența parametrilor de tăiere asupra durtății suprafeței

Influența cuplului de parametri putere-presiune asupra durtății

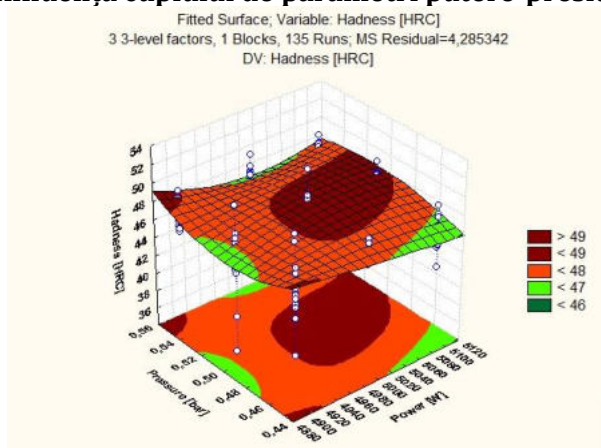


Fig. 5.106 Modelul predicției pătratice $H_a(P,p)$

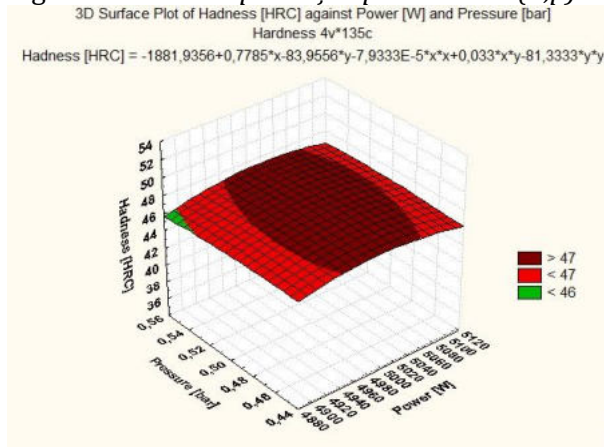


Fig. 5.108 Graficul regresiei pătratice $H_a(P,p)$

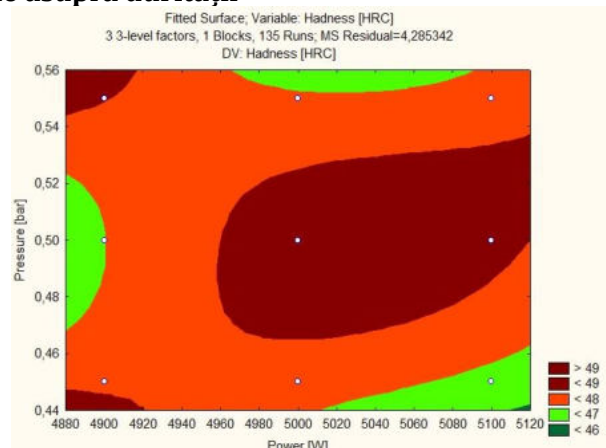


Fig. 5.107 Graficul de contur al predicției $H_a(P,p)$

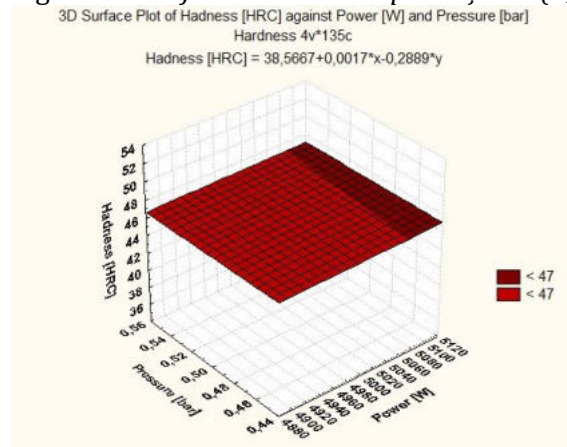


Fig. 5.109 Graficul regresiei liniare $H_a(P,p)$

Influența cuplului de parametri viteză-presiune asupra durtității

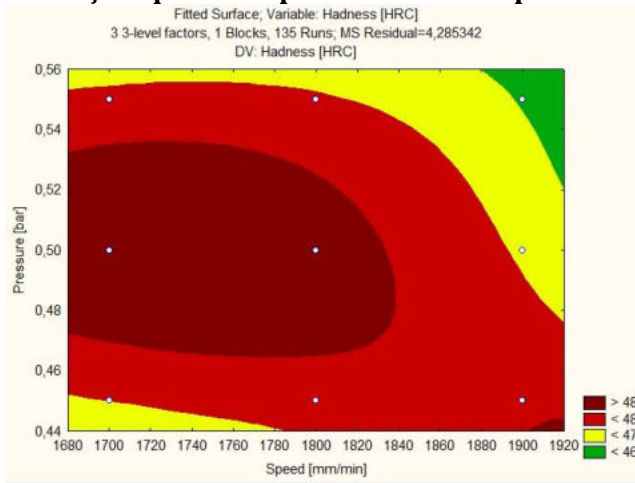


Fig. 5.110 Grafic de contur predicție Ha(v,p)

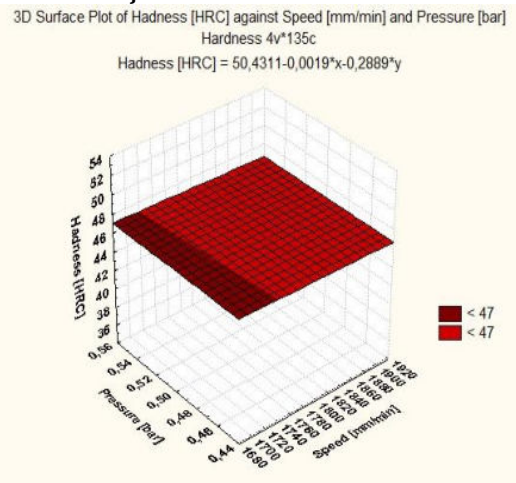


Fig. 5.111 Graficul regresie Ha(v,p)

Influența cuplului de parametri putere-viteză asupra durtității

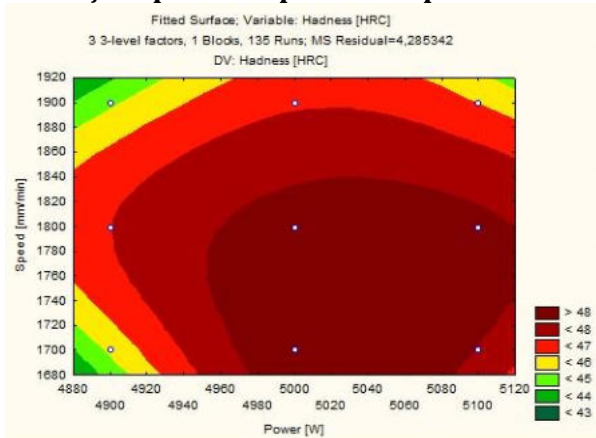


Fig. 5.112 Graficul predicției Ha(P,v)

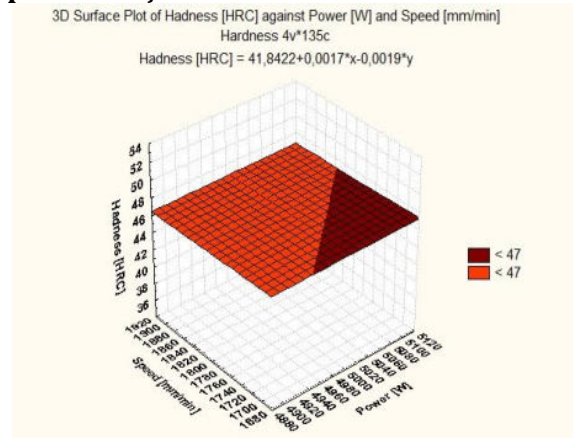


Fig. 5.113 Graficul regresiei Ha(P,v)

5.8.2.2 Influența parametrilor de tăiere asupra rugozității suprafeței [SHU18]

Modelul predictiv și matematic al rugozității Ra putere-viteză:

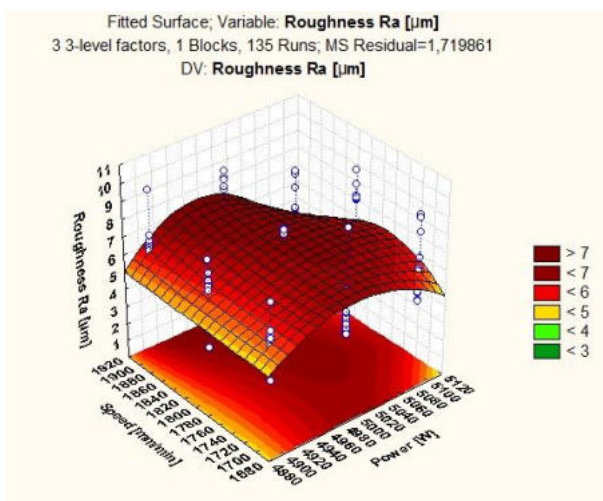


Fig. 5.116 Graficul predictiv Ra(P,v)

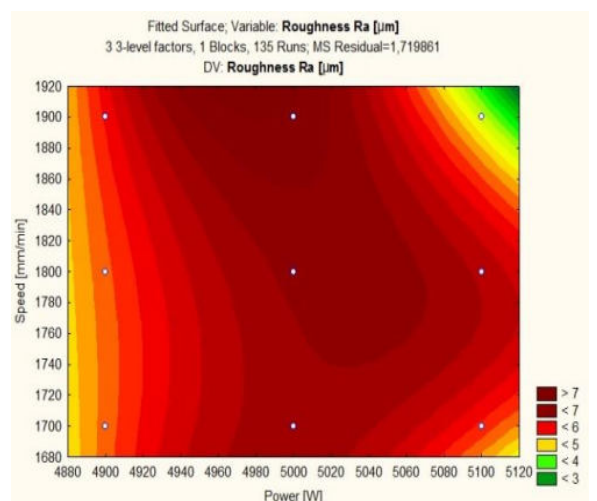


Fig. 5.117 Grafic contur predictiv Ra(P,v)

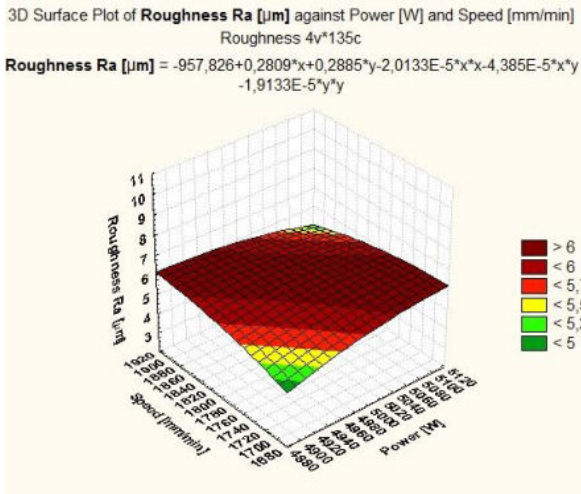


Fig. 5.118 Graficul regresiei pătratic $Ra(P,v)$

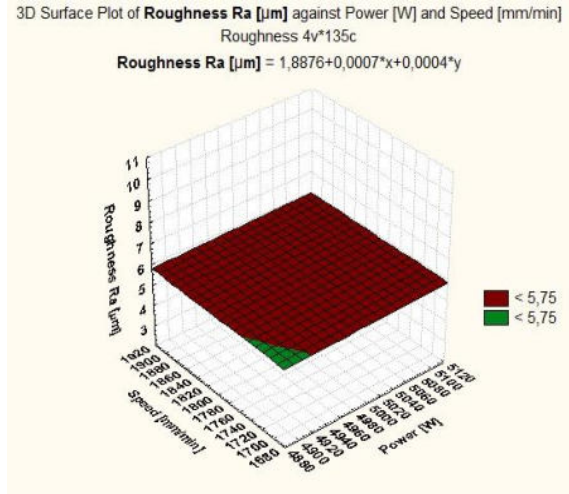


Fig. 5.119 Graficul regresiei liniare $Ra(P,v)$

Modelul predictiv și matematic (liniar și pătratic) al rugozității Ra putere-presiune:

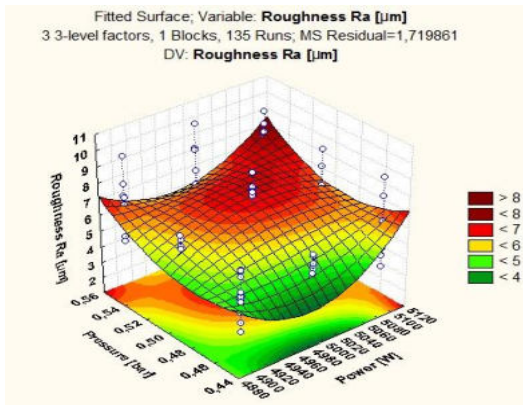


Fig. 5.120 Graficul predictiv pătratic $Ra(P,p)$

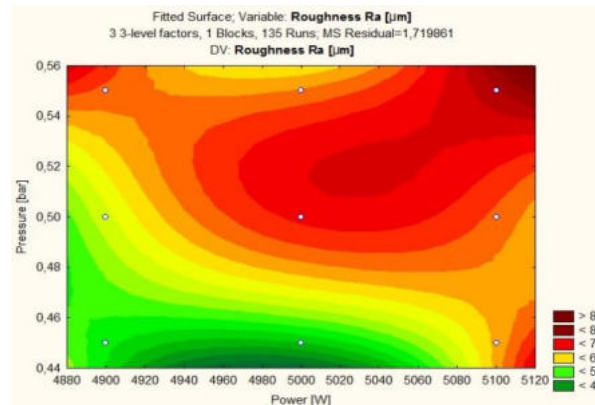


Fig. 5.121 Graficul predictiv $Ra(P,p)$

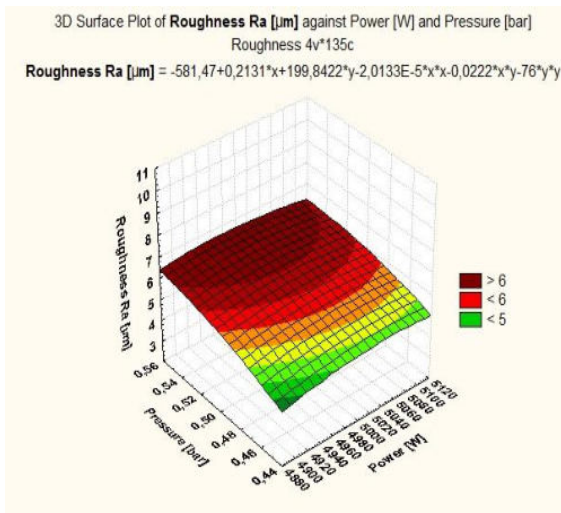


Fig. 5.122 Graficul regresiei pătratic $Ra(P,p)$

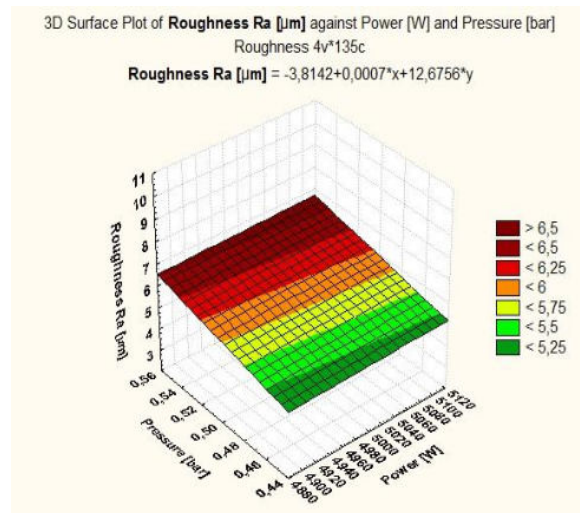


Fig. 5.123 Graficul regresiei liniare $Ra(P,p)$

Modelul predictiv și matematic al rugozității Ra viteză-presiune:

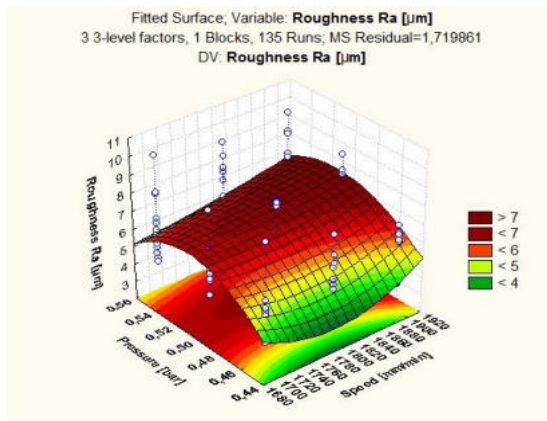


Fig. 5.124 Graficul predictiv pătratic Ra(v,p)

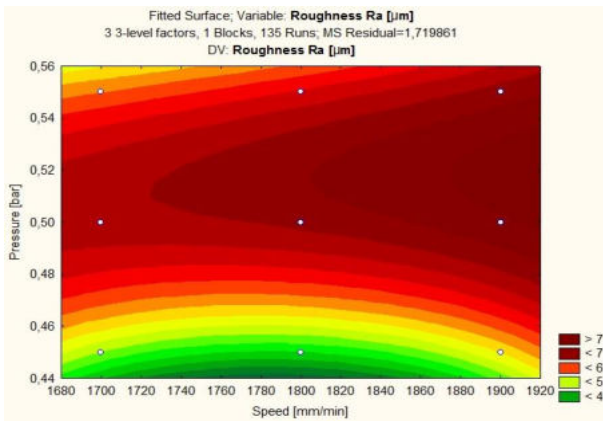


Fig. 5.125 Graficul predictiv Ra(v,p)

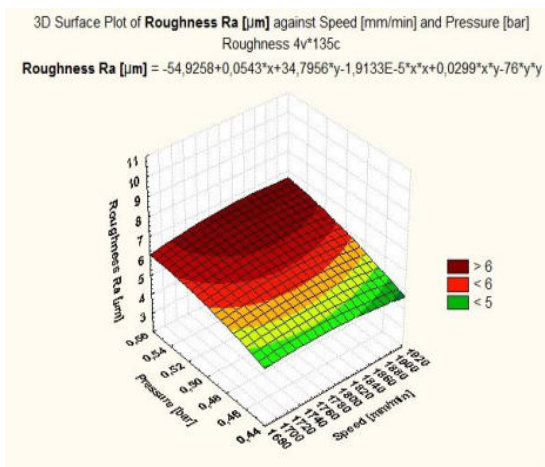


Fig. 5.126 Graficul regresiei pătratic Ra(v,p)

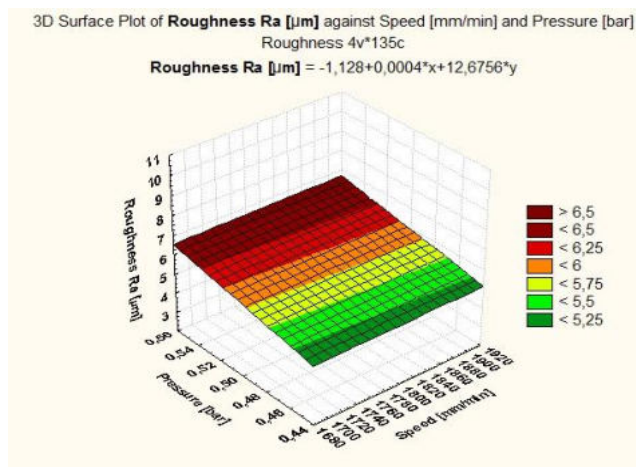


Fig. 5.127(a) Graficul regresiei liniare Ra(v,p)

5.8.2.3 Influența parametrilor de tăiere asupra lățimii de tăiere [GÎR21a]

Influența cuplului de parametri putere-presiune asupra lățimii rostului de tăiere

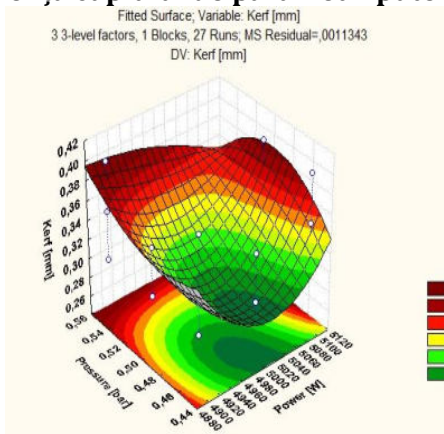


Fig. 5.132 Modelul predicției pătratice Kerf(P,p)

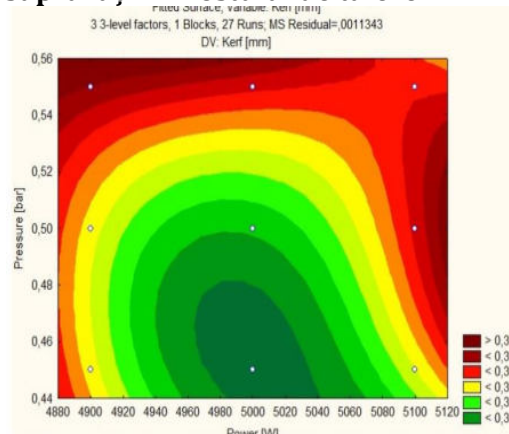


Fig. 5.133 Graficul predicției Kerf(P,p)

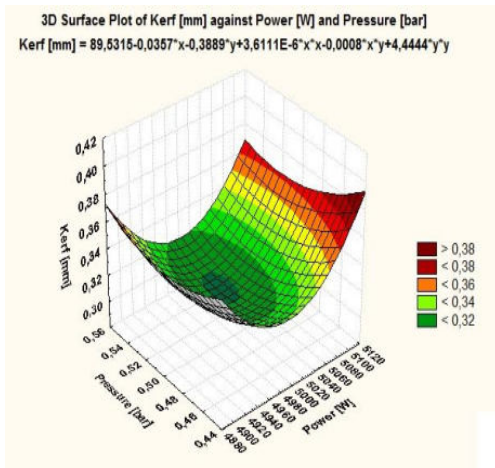


Fig. 5.134 Graficul pătratic $Kerf(P,p)$

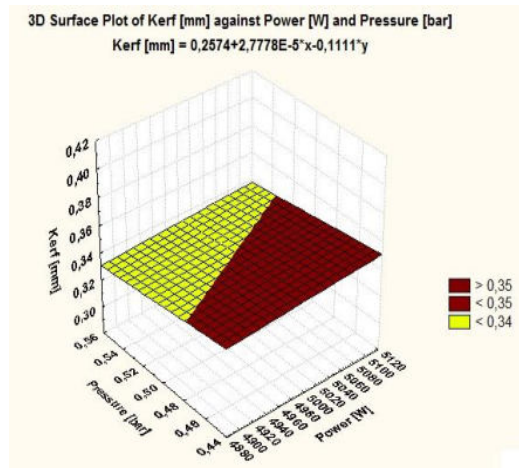


Fig. 5.135 Graficul liniar $Kerf(P,p)$

Influența cuplului de parametri presiune-viteză asupra lățimii rostului de tăiere

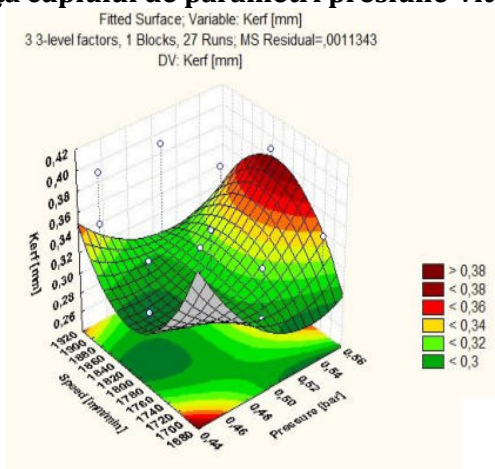


Fig. 5.136 Modelul predicției pătratice $Kerf(p,v)$

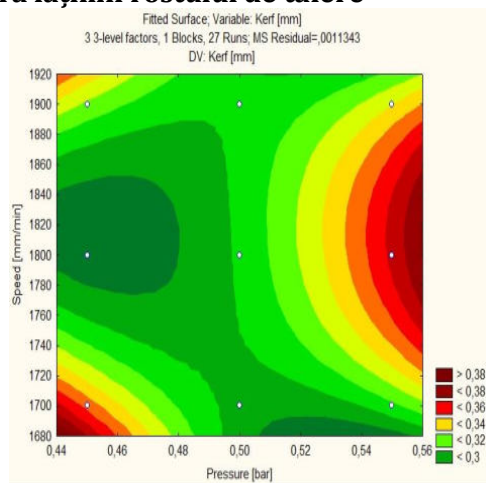


Fig. 5.137 Grafic predictiv $Kerf(p,v)$

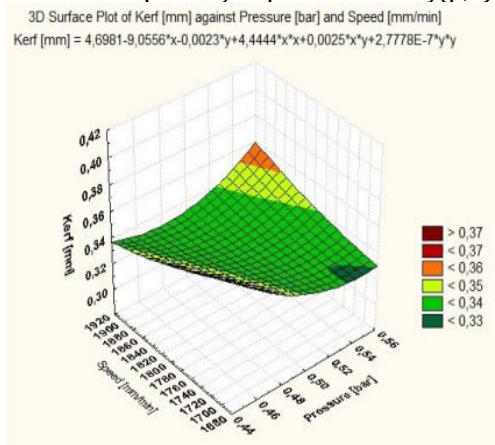


Fig. 5.138 Graficul regresiei pătratice $Kerf(p,v)$

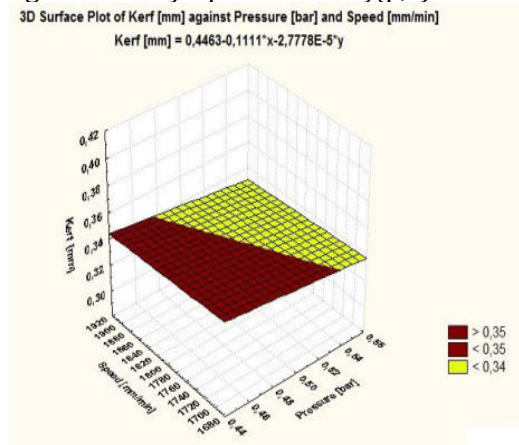


Fig. 5.139 Graficul regresiei liniare $Kerf(p,v)$

Influența cuplului de parametri putere-viteză asupra lățimii fantei de tăiere [GÎR21a]

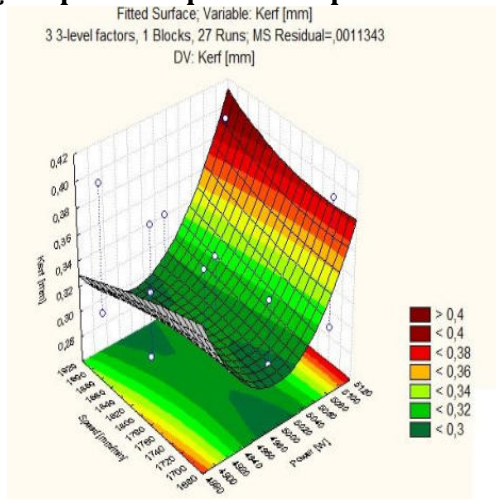


Fig. 5.140 Modelul predicției pătratice Kerf(P,v)

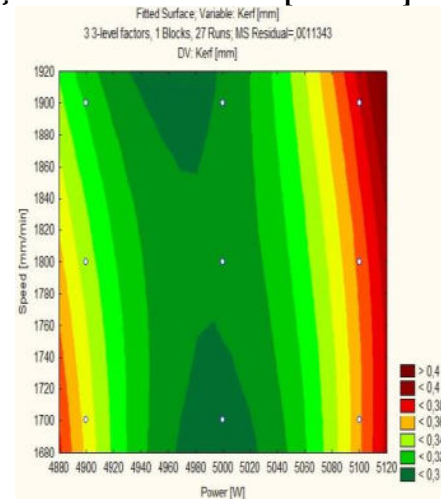


Fig. 5.141 Modelul predicției Kerf(P,v)

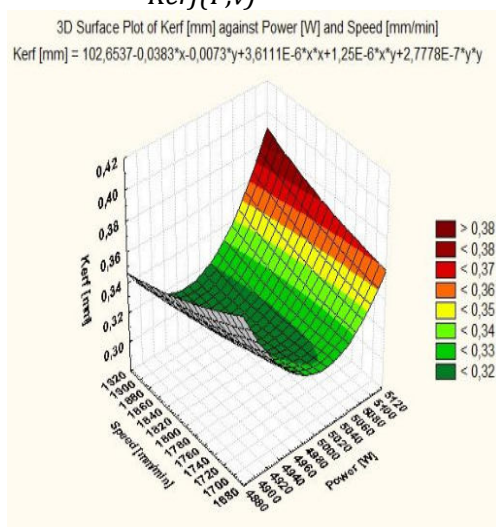


Fig. 5.142 Graficul regresiei pătratice Kerf(P,v)

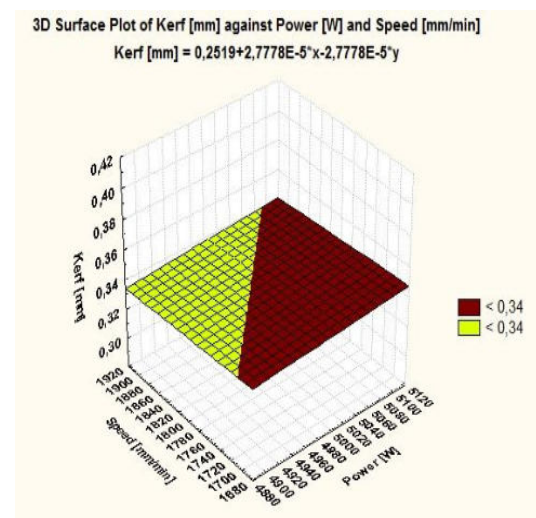


Fig. 5.143 Graficul regresiei liniare Kerf(P,v)

În urma prelucrării cu mijloace specifice a datelor experimentale au rezultat următoarele relații matematice care descriu dependența rezultatelor tăierii cu laserul de parametrii regimului de tăiere:

$$Ha = 38,5667 + 0,0017P - 0,2889p \quad (5.23)$$

$$Ha = -1881,9536 + 0,7785P - 83,9556p - 0,000079333P^2 + 0,033Pp - 81,3333p^2 \quad (5.24)$$

$$Ha = 50,4311 - 0,0019v + 0,2889p \quad (5.25)$$

$$Ha = 41,8422 + 0,0017P - 0,0019v \quad (5.26)$$

$$Ha = 46,731 + 1,206Pp - 1,286vp + 1,041Pp^2 \quad (5.27)$$

$$Ra = 1,8876 + 0,0007P + 0,0004v \quad (5.28)$$

$$Ra = -957,826 + 0,2809P + 0,2885v - 0,00002P^2 - 0,00004385Pv - 0,0000191v^2 \quad (5.29)$$

$$Ra = -3,8142 + 0,0007P + 12,6756p \quad (5.30)$$

$$Ra = -581,47 + 0,2131P + 199,8422p - 0,000020133P^2 - 0,0222Pp - 76p^2 \quad (5.31)$$

$$Ra = -1,128 + 0,0004v + 12,6756p \quad (5.32)$$

$$Ra = -54,9258 + 0,0543v + 34,7956p - 0,0000191v^2 + 0,0299vp - 76p^2 \quad (5.33)$$

$$Kerf = 0,2574 + 0,000027778P - 0,1111p \quad (5.34)$$

$$Kerf = 89,5315 - 0,0357P - 0,3889p + 0,0000036111P^2 - 0,0008Pp + 4,4444p^2 \quad (5.35)$$

$$Kerf = 0,4463 - 0,1111p - 0,000027778v \quad (5.36)$$

$$Kerf = 4,6981 - 9,0556p - 0,0023v + 4,4444p^2 + 0,0025pv + 0,00000027778v^2 \quad (5.37)$$

$$Kerf = 0,2519 + 0,000027778v - 0,000027778P \quad (5.38)$$

$$Kerf = 102,6537 - 0,0383v - 0,0073P + 0,0000036111v^2 + 0,00000125vP + 0,00000027778P^2 \quad (5.39)$$

În urma celor prezentate în acest subcapitol se pot formula o serie de concluzii care pot fi utile pentru cercetare și practica de producție:

1. din datele experimentale rezultă că la combinația parametrilor putere și viteză maximă și presiune medie rezultă rugozitatea cea mai mică;
2. din modelele de analiză statistică rezultă că presiunea gazului este parametrul cel mai semnificativ. Graficele RSM indică influența mai pronunțată a presiunii gazului, la analiza putere-presiune și viteză-presiune asupra rugozității suprafeței Ra;
3. al doilea factor de influență este puterea laserului, iar viteza are cea mai mică influență;
4. valorile parametrilor de intrare folosite pentru a obține piese cu rugozitate minimă sunt: presiunea gazului 0,45 bar, viteza de tăiere 1900 mm/min, puterea laserului 5000 W;
5. suprafețele obținute prin tăierea cu laserul au o rugozitate Ra îmbunătățită atunci când fluxul de gaz are un debit redus, puterea laserului moderată;
6. combinația putere-viteză și putere-presiune au o influență puternică asupra Ra (tabelul 5.36).

5.8.2.4 Influența parametrilor regimului de tăiere asupra înclinării suprafeței prelucrate

Observând în secțiune perpendiculară pe conturul piesei fanta de tăiere dintre piesă și semifabricat [MAD22] se constată că aceasta prezintă datorită înclinării flancurilor o formă generală cu aspectul literei A sau V, ca în figura 5.144 și 5.145:

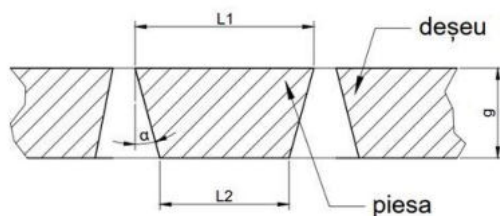


Fig. 5.144 Fanta de tăiere cu flancuri înclinate.
(a) forma A

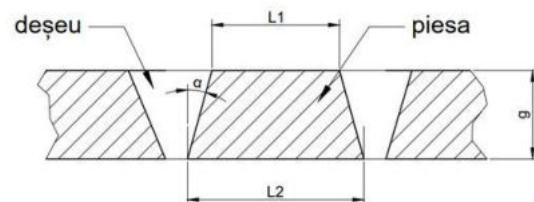


Fig. 5.145 Fanta de tăiere cu flancuri înclinate.
(b) forma V

Se prezintă în figura 5.146 analiza Modelului liniar la impactul factorilor de intrare asupra răspunsului studiat:

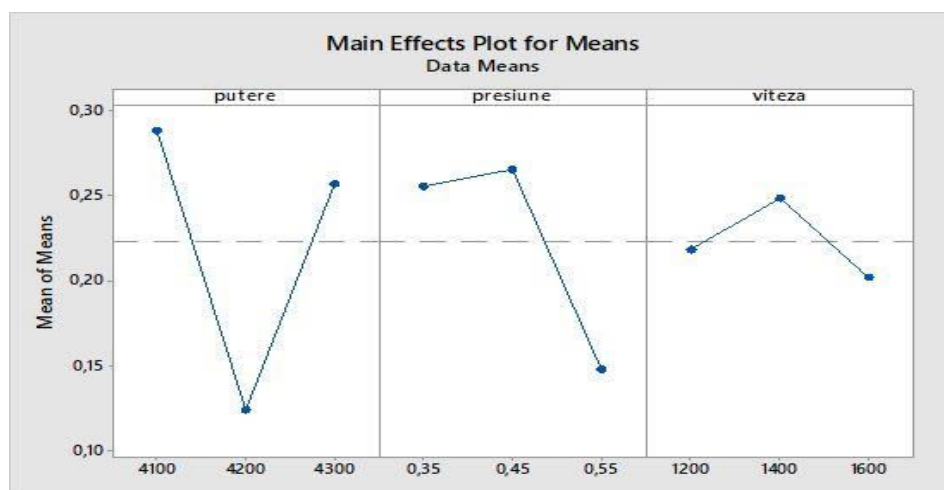


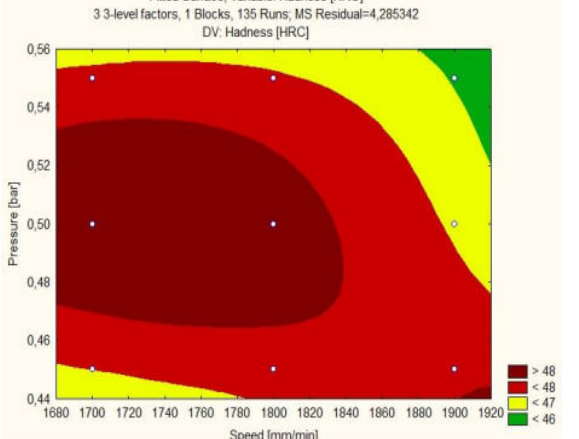
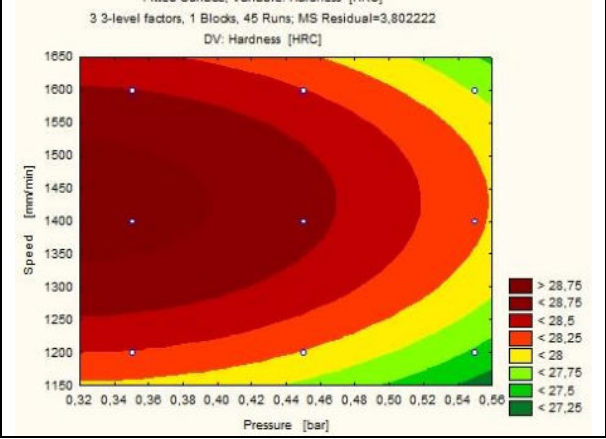
Fig. 5.146 Graficul influenței parametrilor de intrare asupra înclinării flancurilor pieselor

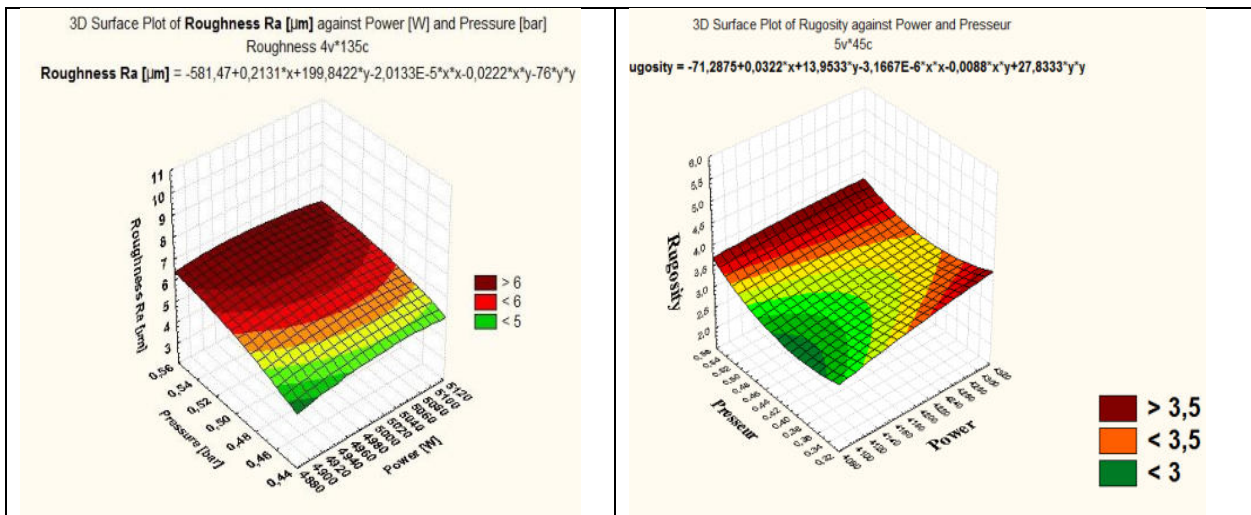
Din graficul efectelor parametrilor de tăiere (fig. 5.146) se constată **preliminar**, următoarele:

1. înclinarea flancurilor este minimă la valoarea medie a puterii și maximă la cea mai mică a acestui parametru de intrare;
2. valorile medii ale vitezei de tăiere și ale presiunii gazului asistent dau valori maxime ale înclinării flancurilor.

5.9 Concluzii

Pe baza celor prezentate în subcapitolele precedente se formulează o serie de concluzii care evidențiază aspectele comune, dar și particularitățile prelucrării prin tăiere cu laserul a tablelor din oțel HARDOX400 cu grosime de 8 mm, respectiv 10 mm.

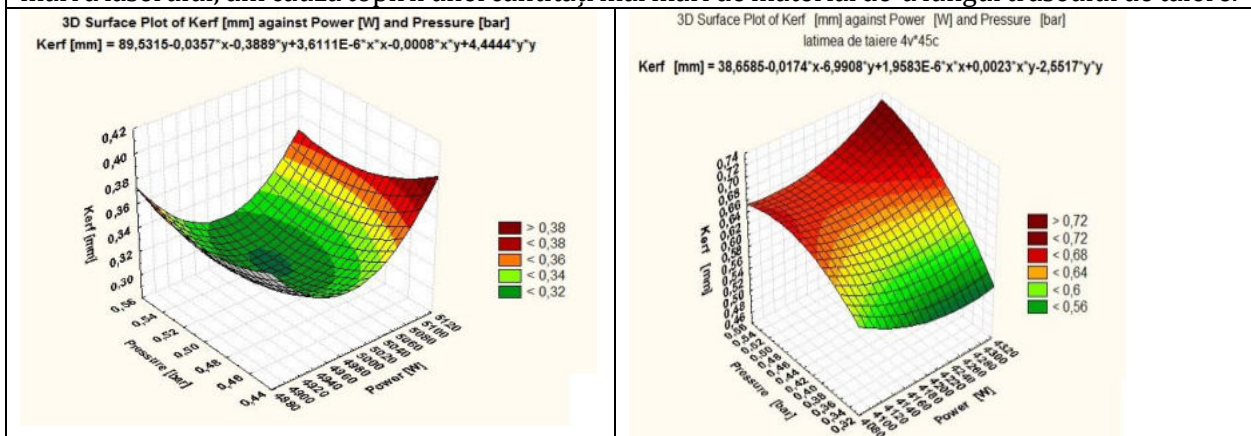
HARDOX400, g=8 mm	HARDOX400, g=10 mm
<p>1. Găurile produse la străpungerea cu fasciculul laser au un diametru mai mare decât lățimea fantei de tăiere obținute pe traseul de abordare a conturului și de-a lungul acestuia. Explicația este că în punctul de intrare spotul laser staționează până când este realizată străpungerea, pentru ca apoi să se deplaseze cu viteza programată. În timpul staționării se acumulează în material o cantitate mare de căldură care provoacă topirea de material în exces. Acesta e și motivul pentru care perforarea se face întotdeauna în afara conturului piesei. În plus, în punctul de perforare laserul operează în regim pulsant, iar în faza de tăiere în regim continuu.</p>	
<p>2. În stratul superficial de-a lungul conturului tăiat concentrația de fier scade, în timp ce cea a manganului, cromului și a molibdenului crește. Compoziția chimică se modifică foarte puțin, fără a influența proprietățile fizice ale stratului superficial. Acestea sunt afectate de modificările privind structura, granulația, etc.</p>	<p>2. Compoziția chimică în stratul superficial a fost modificată: concentrația de molibden și de fier a crescut, în timp ce a de crom a scăzut. Mn scade parțial pe suprafața tăiată.</p>
<p>3. Comportarea diferită a celor două semifabricate poate fi pusă pe seama regimurilor diferite cu care acestea au fost tăiate. Variația concentrației elementelor de aliere în stratul superficial este detectabilă prin mijloacele de investigare științifică, dar totuși suficient de mică pentru a putea fi considerată semnificativă (variația constatată a concentrației elementelor de aliere este de ordinul zecimilor și sutimilor de procent, în consecință se apreciază că alterarea compoziției chimice a materialului în stratul superficial nu este determinantă pentru modificarea proprietăților fizice, în special a durității).</p>	
<p>4. Creșterea durității odată cu reducerea vitezei de tăiere și a presiunii gazului asistent poate fi pusă pe seama acumulării mai intense de căldură în zona influențată termic a piesei. Acest fenomen favorizează formarea mai pronunțată a constituenților duri.</p>	
<p>5. Graficul predictiv (v-p) determină duritatea maximă în condițiile de presiune și viteză medie</p>	
 <p>Fitted Surface: Variable: Hardness [HRC] 3 3-level factors, 1 Blocks, 135 Runs; MS Residual=4,285342 DV: Hardness [HRC]</p>	 <p>Fitted Surface: Variable: Hardness [HRC] 3 3-level factors, 1 Blocks, 45 Runs; MS Residual=3,802222 DV: Hardness [HRC]</p>
<p>6. Duritatea suprafeței tăiate crește peste 45 HRC după prelucrare prin tăiere cu laserul, față de aproximativ 40 HRC la materialul brut (neprelucrat).</p>	
<p>7. La ambele grosimi ale materialului rugozitatea Ra prezintă valori maxime la valorile ridicate ale presiunii gazului asistent, indiferent de puterea laserului (aceasta are o influență redusă)</p>	



Se constată o bună asemănare a comportării oțelului HARDOX400, $g=8$ mm cu HARDOX400, $g=10$ mm sub aspectul rugozității maxime obținute în condițiile utilizării presiunii maxime a gazului asistent la orice nivel al puterii laserului. Se observă că Ra scade când puterea și presiunea se apropie de valoarea minimă.

8. Lățimea fantei de tăiere este influențată de cuplul de parametri de intrare putere – presiune (P-p) asemănător pentru cele două grosimi ale semifabricatelor. Se constată totuși o deplasare a zonei de Kerf minim către valori medii ale puterii laserului la $g=8$ mm. În timp ce la $g=10$ mm Kerf minim se produce la valori apropiate de maxim ale puterii laserului.

La ambele semifabricate se constată creșterea lățimii fantei de tăiere la utilizarea unei puteri mai mari a laserului, din cauza topirii unei cantități mai mari de material de-a lungul traseului de tăiere.



9. Lățimea de tăiere medie este de 0,348 mm.

Lățimea de tăiere medie este de 0,619 mm.

10. Lățimea medie a fantei de tăiere este mai mare la semifabricatul mai gros, pentru că acesta necesită o cantitate de energie mai mare pentru a fi străpuns și tăiat.

Pot fi formulate următoarele patru concluzii generale:

1. În privința măsurii în care cei trei parametri de ieșire sunt afectați de variația datelor de intrare ale regimului de tăiere se constată că cel mai sensibil parametru de ieșire este rugozitatea, iar cel mai puțin sensibil este duritatea stratului superficial al suprafeței prelucrate.
2. Fiecare dintre parametrii de intrare (predictori) acționează cu intensități diferite asupra răspunsurilor. Astfel, pentru rugozitate, cel mai influent factor este viteza de tăiere la semifabricatul cu $g=10$ mm și presiunea gazului asistent la $g=8$ mm.
3. Pentru duritate cel mai influent factor este puterea laserului la semifabricatul cu $g=10$ mm și termenul (p X v) care cuantifică interacțiunea dintre presiune și viteză la $g=8$ mm.
4. Pentru lățimea de tăiere-Kerf cel mai influent factor este presiunea gazului asistent la semifabricatul cu $g=10$ mm. La semifabricatul cu $g=8$ mm nu s-a identificat o influență preponderentă evidentă a vreunui predictor. [HOH20]

CAPITOLUL 6 Validarea practică a modelelor matematice determinate

În vederea verificării și validării rezultatelor obținute în etapa de cercetare experimentală au fost efectuate câteva studii de caz. Au fost prelucrate piese urmărind o anumită valoare țintă pentru rugozitate sau duritate. Parametrii regimului de tăiere au fost selectați conform valorilor rezultate din utilizarea relațiilor matematice determinate în pe baza cercetării experimentale. În funcție de abaterea valorii realizate fizic față de cea estimată s-au putut trage concluzii asupra corectitudinii relațiilor matematice determinate prin prelucrarea științifică a datelor experimentale. În continuare se prezintă câteva astfel de studii de caz și rezultatele lor.

Trebuie menționat că în anumite situații eroarea relativă constatată poate părea mare din punct de vedere științific. Totuși, se amintește faptul că pentru relațiile matematice analizate se urmărește aplicabilitatea în practică, și că în acest domeniu rezultatele sunt afectate și de influența (multor) altor factori – puritatea gazului asistent și natura lui, poziția punctului de focalizare, diametrul spotului laser, diametrul duzei, și nu au fost enumerați cu toții. Chiar în cazul unor erori relative aparent mari, acestea au fost considerate acceptabile, atâta timp cât rezultatele nu au fost afectate semnificativ, de exemplu, clasa de rugozitate a fost aceeași pentru valoarea estimată și cea realizată fizic.

6.1 Validarea relației pentru estimarea rugozității

Relația avută în vedere este cea care determină rugozitatea în funcție de viteza de tăiere și presiunea gazului asistent (6.1)

$$Ra = 20,2509 - 3,547p - 0,0229v + 27,8333p^2 - 0,0139vp + 0,0000099v^2 \quad (6.1)$$

Datele de intrare ale procesului de tăiere pentru prelucrarea test sunt prezentate în tabelul 6.1:

Tab. 6.1 Parametrii de tăiere utilizați în experimentele de verificare Ra

Parametrii de intrare	Mediu	Unitate de măsură
Puterea laserului	4200	W
Presiunea gazului asistent	0,45	bar
Viteza de tăiere	1300	mm/min

Rugozitatea pieselor prelucrate cu regimul menționat mai sus a fost măsurată în aceleași condiții ca în cazul cercetării experimentale. Valorile înregistrare ale datelor experimentale sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tab. 6.2 Date experimentale ale rugozității Ra la piesa 2

Nr. piesă	Rugozitatea Ra	Unitate de măsură
1	2,98	μm
2	3,88	μm
3	4,25	μm
4	3,00	μm
Ra mediu	3.52	μm

Se constată că abaterea valorii Ra obținute practic (3.52 μm) are o abatere de 0,40 μm față de cea estimată teoretic (3,12 μm) cu relația (6.1), ceea ce indică o bună corelare între ele. Concluzia este că relația (6.1) este verificată în practică, deci este de încredere. Cele două valori se încadrează în aceeași clasă de rugozitate – 3.2

O altă variantă de a verifica relația matematică este următoarea: se impune obținerea de piese cu o anumită rugozitate (Ra=3.20 μm) în condițiile utilizării unei viteze de tăiere impusă de 1300

mm/min. Cu relația 6.1 se poate determina presiunea gazului asistent care ar trebui reglată pentru a răspunde obiectivului $Ra=3.20 \mu\text{m}$.

Conform acestei relații, înlocuind valorile dorite pentru Ra și v se obține

$$27,8333p^2 - 21,61p + 4 = 0 \quad (6.2)$$

cu una din rădăcini $p=0.47$ bar.

Prelucrând piesele test în aceste condiții ($v=1300$ mm/min și $p=0.47$ bar) și măsurând rugozitatea se constată o valoare medie globală a acesteia de $3,19 \mu\text{m}$. Valoarea rugozității obținută practic prezintă o abatere de $0,33\%$ față de cea fixată ca obiectiv. Și în acest caz concluzia este că relația (6.1) este verificată în practică, deci este de încredere.

6.2 Validarea relației pentru estimarea durității

Pentru validarea relației (6.3) se aplică un parcurs similar cu cel prezentat în subcapitolul precedent, cu adaptările de rigoare.

$$Ha = 31,6333 - 3,8667p - 0,001v \quad (6.3)$$

Tab. 6.3 Date experimentale ale durității Ha la piesa 1

Nr. piesă	Duritatea	Unitate de măsură
1	30	HRC
2	30	HRC
3	27	HRC
4	30	HRC
Ha mediu	29,25	HRC

Se constată că valoarea durității obținută practic ($29,25$ HRC) are o abatere de ($0,66$ HRC) peste 2% față de cea estimată teoretic ($28,59$ HRC) cu relația (6.3), ceea ce indică o bună corelare între ele. Concluzia este că relația (6.3) este verificată în practică, deci este de încredere.

O altă metodă de a verifica relația de regresie pătratică este următoarea: se impune obținerea de piese cu o anumită duritate ($Ha=29$ HRC) în condițiile utilizării unei viteze de tăiere impusă de 1300 mm/min. Cu relația 6.4 se poate determina presiunea gazului asistent care ar trebui reglată pentru a răspunde obiectivului $Ha=29$ HRC.

$$Ha = -9,9208 - 21,0167p + 0,065v - 14p^2 + 0,0212pv - 0,000027v^2 \quad (6.4)$$

Conform acestei relații, înlocuind valorile dorite pentru Ha și v se obține $p=0,46$ bar. Deoarece reglarea presiunii pe mașina de tăiere cu laserul se poate face în trepte de $0,05$ bar, nu poate fi reglată presiunea de $0,46$ bar. Pentru prelucrarea pieselor test s-a utilizat presiunea de $0,45$ bar. Pentru a avea aceiași termeni de comparație se determină cu relația 6.4 duritatea Ha corespunzătoare parametrilor de intrare $v=1300$ mm/min și $p=0.45$ bar. Rezultă o valoare de $29,05$ HRC. Această valoare a durității are o abatere de sub $0,20$ HRC față de valoarea obținută în practică, ceea ce indică o eroare de sub 1% între valoarea obținută din teorie și valoarea practică. Și în acest caz concluzia este că relația (6.4) este verificată în practică, deci este de încredere. Acest fapt vine să confirme și faptul că funcția pătratică este mai exactă decât cea liniară unde eroarea este de peste 2% .

6.2 Concluzii

Pe baza celor constatate în prezentul capitol se pot formula următoarele concluzii:

1. toate relațiile matematice liniare și pătratice au fost validate și pot fi folosite în practica de producție și în cercetare prin înlocuirea directă a valorilor parametrilor de intrare utilizați;
2. valorile rugozității și durității calculate au o abatere redusă față de cele medii obținute pe cale experimentală.

CAPITOLUL 7 Concluzii finale

7.1 Concluzii generale

În urma cercetărilor efectuate se desprind următoarele **Concluzii generale**:

1. factorul viteza de tăiere este cel mai influent asupra rugozității suprafeței Ra la $g=10$ mm.
2. factorul presiunea gazului asistent este cel mai influent asupra rugozității suprafeței Ra la $g=8$ mm.
3. factorul puterea laserului este cel mai influent asupra durității stratului afectat termic la $g=10$ mm.
4. factorii viteza de tăiere și presiunea gazului asistent interacționează liniar fiind cei mai influenți asupra durității la $g=8$ mm.
5. factorul presiunea gazului asistent este cel mai influent asupra lățimii fantei de tăiere la $g=10$ mm.
6. atât la $g=10$ mm cât și la $g=8$ mm duritatea medie de sub stratul superficial scade, respectiv duritatea medie a stratului superficial crește în urma prelucrării cu laserul scade față de duritatea inițială.
7. la $g=10$ mm valoarea medie a Kerf este de 0,619 mm, iar la $g=8$ mm Kerf are valoarea medie este de 0,348 mm.
8. unele din relațiile matematice care descriu rugozitatea Ra la $g=10$ mm au fost determinate prin două metode (regresie și interpolare Lagrange), conducând la rezultate asemănătoare, care se confirmă reciproc.

7.2 Contribuțiile personale ale tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat prezintă o serie de contribuții personale sintetizate în cele ce urmează:

1. clasificarea realizărilor științifice din domeniul tezei de doctorat prezentate în literatura de specialitate după diverse criterii:
 - a) surse – articole științifice, momografii/manuale/cărți, teze de doctorat;
 - b) materiale prelucrate cu laserul: materiale metalice – oțeluri/fonte/aliaje neferoase, materiale nemetalice;
 - c) domenii de utilizare a laserului: industrie/medicină/comunicații/militar etc;
 - d) procedee de prelucrare cu laserul: tăiere/găurire/sudare etc;
2. determinarea influenței unora din proprietățile magnetoelectrice și termice ale materialului prelucrat asupra consumului de energie la tăierea metalelor cu laserul;
3. studiul privind posibilitățile de control al presiunii gazului asistent prin construcția duzei;
4. identificarea aportului suplimentar de căldură obținută în urma transformării prin efect Joule a curentului electric indus în piesă de variația câmpului electromagnetic a fasciculului laser;
5. utilizarea combinată a unor teorii ale Prof. I. Agârbiceanu [AGÎ56] și ale cercetătorului L. D. Landau [LAN63] pentru a demonstra analitic constatările experimentale referitoare la influența proprietăților electromagnetice ale materialului asupra caracteristicilor radiației electromagnetice;
6. definirea a trei indicatori de eficiență energetică la tăierea cu laserul, indicatori aplicabili unitar în contexte tehnologice diferite.
7. studiul lățimii fantei de tăiere ca un factor cu importanță tehnologică sub aspectul utilizării valorii sale în determinarea corecției de rază a sculei la programarea conturului de prelucrat. În mod indirect estimarea corectă a valorii acestei mărimi poate contribui la asigurarea preciziei dimensionale a piesei;
8. efectuarea cercetărilor experimentale asupra unui material (HARDOX) frecvent utilizat în fabricația produselor, dar pentru care nu au fost identificate în literatura de specialitate, recomandări privind alegerea parametrilor regimului de tăiere;
9. determinarea pe baza cercetării experimentale a unor relații matematice care descriu dependența răspunsurilor de predictorii după cum urmează:
 - duritate = $f(\text{putere}, \text{presiune})$, duritate = $f(\text{putere}, \text{viteză})$, duritate = $f(\text{presiune}, \text{viteză})$;
 - rugozitate = $f(\text{putere}, \text{presiune})$, rugozitate = $f(\text{putere}, \text{viteză})$, rugozitate = $f(\text{presiune}, \text{viteză})$;
 - Kerf = $f(\text{putere}, \text{presiune})$, Kerf = $f(\text{putere}, \text{viteză})$, Kerf = $f(\text{presiune}, \text{viteză})$;
10. determinarea tuturor acestor relații atât în varianta liniară cât și pătratică;

11. identificarea predictorului cel mai influent pentru rugozitate, duritate și Kerf la piesele realizate din semifabricate cu grosimea de 8 și 10 mm;
12. identificarea celei mai sensibile mărimi de ieșire la modificarea valorilor predictorilor;
13. validarea rezultatelor prin studii de caz [URS86];
14. validarea unora din relațiile matematice determinate prin aplicarea unor metode alternative (metoda de interpolare Lagrange);

7.3 Valorificarea și diseminarea rezultatelor cercetării științifice

Lucrarea se alătură tezelor de doctorat care au studiat prelucrarea materialelor cu laserul. Rezultatele finale obținute în cadrul activității de cercetare pot fi aplicate în domeniul industrial. Rezultatele teoretice și practice pot fi aplicate în procese didactice și în producție.

În cadrul activităților de diseminare și valorificare a rezultatelor cercetării științifice autorul a publicat o serie de articole în țară și străinătate care să susțină pregătirea teoretică și practică în domeniul utilizării laserului cu CO₂ pentru fabricația produselor industriale din materiale din gama HARDOX. Cercetările și studiile publicate și/sau prezentate la conferințe științifice sunt structurate în lista lucrărilor publicate:

Lista de lucrări publicate pe parcursul stagiului de doctorat

1. Articole publicate în jurnale indexate Web of Science:

- 1.1 Mileșan Mihaela, Gîrdu C. Cristinel, Cîrțină Liviu, Rădulescu Constanța Mathematical Modelling Study of Hardox 400 steel parts Roughness and Hardness, Cut with CO₂ laser, Strojnicki Vestnik Journal of Mechanical Engineering, 66(2020)2, 127-141, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6320>. (IF=1,554), <https://www-webofscience-com.am.e-nformation.ro/wos/woscc/full-record/WOS:000513872300005>
- 1.2 Constantin Cristinel Girdu; Catalin Gheorghe; Constanta Radulescu; Daniela Cirtina, Influence of process parameters on cutting width in CO₂ laser processing of Hardox 400 steel, Appl. Sci. 2021, 11(13), 5998; <https://doi.org/10.3390/app11135998>. (IF=2,474), <https://www-webofscience-com.am.e-nformation.ro/wos/woscc/full-record/WOS:000672334200001>

2. Articole publicate în jurnale:

- 2.1 Constantin Cristinel Girdu and Catalin Gheorghe, Energy efficiency in CO₂ laser processing of Hardox 400 material, (IF=3,74), Materials, 2022

<https://doi.org/10.3390/ma15134505>

3. Lucrări indexate în Baze de Date Internaționale BDI:

- 3.1 Gîrdu C. Cristinel, L. A Mihail, Drăgoi M. Viorel, Estimation of laser cutting process efficiency, IRMES Research and Development of mechanical elements and systems, KRAGUJEVAC, Serbia, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659 (2019) 012045 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/659/1/012045.
- 3.2 Constantin Cristinel Gîrdu, Mircea Viorel Dragoi, Mihaela Milesan, Laurentiu - Aurel Mihail, Liviu Cirtina and Constanta Radulescu, Study of cutting parameters influence on the surface roughness at laser processing of Hardox400 steel, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1009 (2021) 011001, doi:10.1088/1757-899X/1009/1/011001.
- 3.3 Constantin Cristinel Girdu, Badea Lepădătescu, Experimental research methods for CO₂ laser cutting of HARDOX400 steel, INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS APPLICATIONS, ENGINEERING & DEVELOPMENT DOI: 10.46300/91015.2021.15.8, Volume 15, 2021.

4. Alte lucrări:

- 4.1 Gîrdu C. Cristinel, Mathematical modeling for soft laser beam processing, International Journal of Applied Physics, Volume 3, 2018.

<http://www.iasas.org/iasas/journals/jap> pg 20-25, www.semanticscholar.org.

- 4.2 Gîrdu C. Cristinel, Management and Resources in the Research project: Carbon dioxide Laser with Applications in Industrial Engineering, International Journal of Economics and Management Systems, <http://www.iasas.org/iasas/journals/ijems>, Dubrovnik, Croația, 2018.

Lista citărilor lucrărilor publicate

Unele dintre articolele prezentate mai sus au stârnit interesul unor cercetători dobândind citări conform celor prezentate în tabelul 7.1.

Diseminarea rezultatelor cercetării științifice s-a realizat odată cu publicarea de articole în jurnalul Strojinski și Applied Science indexate ISI. Alți autori au studiat lucrările ISI recent publicate pe WEB OF SCIENCE și le-au folosit în studiul lor. Aceștia au apreciat rezultatele obținute despre rugozitate Ra și lățimea de tăiere Kerf pe semifabricatul de HARDOX400. Autori consacrați au enumerat în introducere și bibliografia lucrării o scurtă descriere a rezultatelor obținute la oțelul HARDOX400 cu prilejul publicării cercetărilor în domeniul prelucrării cu laser. Articolele doctorandului au fost citate de către 4 autori și colaboratori străini, respectiv 1 teză de doctorat. Acestea sunt prezentate în tabelul 7.1:

Tabelul 7.1 *Lista citărilor*

Articol	Citat în:
Mathematical Modelling Study of Hardox400 Steel Parts' Roughness and Hardness, Cut with CO2 Laser	<p>Experimental investigation to optimize laser cutting process parameters for difficult to cut die alloy steel using response surface methodology</p> <p>Patel, Amit; Bhavsar, Sanket N.</p> <p>Conference: 1st International Conference on Energy, Materials Sciences and Mechanical Engineering (EMSME) Location: Delhi, INDIA Date: OCT 31-NOV 01, 2020</p> <p>MATERIALS TODAY-PROCEEDINGS Volume: 43 Pages: 28-35 Part: 1 Published: 2021</p>
Influence of process parameters on cutting width in CO ₂ laser processing of Hardox 400 steel	<p>Effect of Process Parameters on the Quality of Laser-Cut Stainless Steel Thin Plates</p> <p>Irene Buj-Corral, Lluís Costa-Herrero and Alejandro Domínguez-Fernández</p> <p>Department of Mechanical Engineering, School of Engineering of Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona, Spain</p> <p>Metals 2021, 11(8), 1224; https://doi.org/10.3390/met11081224</p>
Influence of process parameters on cutting width in CO ₂ laser processing of Hardox 400 steel	<p>Application of a Robust Decision-Making Rule for Comprehensive Assessment of Laser Cutting Conditions and Performance</p> <p>Miloš Madic, Goran Petrovic, Dušan Petkovic, Jurgita Antucheviciene and Dragan Marinkovic</p>

	<p>Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Transport Systems, Technische Universität Berlin,</p> <p>Machines/2022,10,153. https://doi.org/10.3390/machines10020153</p>
Some applications of CO ₂ laser in industrial engineering	<p>Optics and Apparatus for CO₂ and CO Laser Micro-processing.</p> <p>Hohnholz A., Rettschlag K., Desens M., Taschner P.A., Overmeyer L. (2020)</p> <p>In: Sugioka K. (eds) Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering. Springer Nature Switzerland AG. Cham. Pp 1-37</p> <p>https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_4-1</p>
Some applications of CO ₂ laser in industrial engineering	<p>ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ (DEZVOLTAREA ȘI APLICATIILE SUPRAFETELOR NOROLOGICE ȘI STRUCTURATE HIBRIDE)</p> <p>ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ (TEZĂ DE DOCTORAT)</p> <p>Πάτρα 2020 (Patras 2020)</p> <p>Κανίδη Μαρία Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού (Kanidi Maria Absolventa in Inginerie Chimica)</p> <p>ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ UNIVERSITATEA DIN PATRAS ȘCOALA DE ȘTIINȚE POZITIVE DEPARTAMENTUL DE ȘTIINȚA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR</p>

Din pagina fiecărui jurnal au fost observate datele privind contorizarea articolului (tabelul 7.2)

Tabelul 7.2 Lista accesărilor articolelor ISI

Jurnal	Articol	Vizualizări	Descărcări	Data	Factor de Impact
Strojinski 2020	Mathematical Modelling Study of Hardox400 Steel Parts' Roughness and Hardness, Cut with CO ₂ Laser	1302	1603	17.04.2022	1,554
MDPI Applied Sciences 2021	Influence of process parameters on cutting width in CO ₂ laser processing of Hardox 400 steel	570	558	17.04.2022	2,474

Au fost publicate 3 articole în jurnale indexate ISI, 1 articol în Conferințe cu Proceedings ISI, 2 articole în conferințe indexate BDI,

7.4 Direcții de dezvoltare a cercetării

Preocupările pentru viitor sunt de a dezvolta proiecte experimentale și studii de cercetare bazate pe tăierea pieselor din HARDOX500, HARDOX550, HARDOX600 cu ajutorul laserului. Motivele expuse anterior au condus la următoarele direcții de cercetare:

D1: Extinderea cercetărilor către alte materiale din aceeași categorie - H500, H550, H600.

D2: Determinarea unor relații matematice care să caracterizeze dependența rezultatelor tăierii cu laserul de predictorii pentru noile materiale studiate

D3: Focalizarea cercetărilor în direcția identificării unei influențe sistematice a vreunui predictor asupra înclinării flancurilor.

Se vor identifica noi relații matematice care să stabilească noi răspunsuri de ieșire în funcție de parametri de intrare (puterea laserului, presiunea gazului asistent, viteza de tăiere, diametrul duzei, distanța duză-piesă, poziția focală) pentru alte grosimi și modele HARDOX sau alte materiale.

Cercetările își propun să aducă noi contribuții științifice în fabricația produselor industriale prelucrate cu noile tipuri de instalații cu fibră și CO₂.

Direcțiile de cercetare vor impune dezvoltarea de noi conținuturi științifice care îmbogățesc literatura de specialitate în domeniul prelucrării materialelor cu ajutorul laserului.

Bibliografie

- [AGÎ56] Agîrbiceanu, I., *Lumina polarizată și aplicațiile ei în știință și tehnică*, Editura Tehnică, București, 1956
- [ALT19] Altuğ, M., „*Investigation of Hardox 400 Steel exposed to heat treatment processes in WEDM*”, Politeknik Dergisi, 22(1): 237-244, doi: 10.2339/politeknik.417764, 2019
- [AHN16] Ahn, J. W.; Woo, W. S.; Lee, C. M., *A Study On The Energy Efficiency Of Specific Cutting Energy In Laser-Assisted Machining*, Appl Therm Eng (94) 748-53, 2016
- [BUZ15] Buzatu, C.; Gîrdu C. C., ***Studies regarding the Risks that Companies must face on Selling their Products***, Management, Marketing and Finances, Seul, Korea de Sud, 2015
- [CHE14] Chen, Z., *Applications of optical path length compensation technology for high power CO₂ laser cutting process*, Advances in Materials and Processing Technologies XV, 2014
- [COR21] Corral, I.B.; Herrero, L. C.; Fernández A.D., *Effect of Process Parameters on the Quality of Laser-Cut Stainless Steel Thin Plates*, Spain, Metals 2021, <https://doi.org/10.3390/met11081224>
- [DAR20] Darwish, M. L.; Orazi, L.; Reggiani, B., *Modeling and analysis of the visualized gas-assisted laser cutting flow from both conical and supersonic nozzles*, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Volume: 106, doi: 10.1007/s00170-019-04915-4, 2020
- [DON85] Donțu, O., *Tehnologii de prelucrare cu laser*, Editura Tehnică, 1985
- [DRĂ86] Dragănescu, V.; Velculescu V. G., *Prelucrări termice cu lasere*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1986
- [GÎR19a] Gîrdu, C. C.; Mihail, L. A.; Dragoi, M.-V., ***Estimation of laser cutting process efficiency***, IRMES 2019, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659 012045 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/659/1/012045, 2019
- [GÎR19b] Gîrdu, C. C.; Dragoi, M.-V.; Milesan, M.; Radulescu, C., ***Laser cutting of soft steel in industrial parts manufacturing***, Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series, No. 2/2019
- [GÎR21a] Gîrdu, C. C.; Gheorghe, C.; Radulescu, C.; Cirtina, D., ***Influence of Process Parameters on Cutting Width in CO₂ Laser Processing of Hardox 400 Steel***, Appl. Sci., <https://doi.org/10.3390/app11135998>, 2021

- [GÎR21b] Girdu, C. C.; Dragoi, M.-V.; Milesan, M.; Mihail, L. A.; Cirtina, L.; Radulescu, C., *Study of input parameters influence on the surface quality at laser processing of Hardox 400 steel*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, doi:10.1088/1757-899X/1009/1/012022, 2021
- [GÎR22] Girdu, C. C.; Gheorghe, C., *Energy efficiency in CO₂ laser processing of Hardox 400 material*, (IF3,74), Materials, 2022 (ISSN 1996-11994) on 23 June 2022
- [GYO17] Gyozev, S. V.; Glova A. F., et al., *Attenuation of Laser Radiation by the Flame of Burning Hydrocarbons and Efficiency of Remote Cutting of Metals*, III International conference on laser and plasma researches and technologies, Journal of Physics Conference Series, 941, Moscow, Russia, Jan 24-27, 2017
- [HAJ19] Hajad, M.; Tangwarodomnukun, V.; Jaturanonda, C.; Dumkum, C., *Laser cutting path optimization with minimum heat accumulation*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/ s00170-019-04455-x, 2019
- [HOH20] Hohnholz A.; Rettschlag K.; Desens M.; Taschner P.A.; Overmeyer L., *Optics and Apparatus for CO₂ and CO Laser Micro-processing*, In: Sugioka K. (eds) Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering. Springer Nature Switzerland AG. Cham. Pp 1-37, https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_4-1 (2020)
- [KAV20] Κανίδη Μ., Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού, *ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ*, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, Πάτρα 2020
- [KIM19] Kim, D.; Lee, S.; Park, B. H., *Analysis of the Effects of Supersonic Assist Gas for Laser Cutting Using Normal Shock Theory*, Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers B, Volume: 43, Issue: 4, Pages: 231-239, doi: 10.3795/KSME-B.2019.43.4.231, 2019
- [KOV87] Kovalenko, V. S.; și al., *The efficient processes of cutting with the laser beam*, Kyiv Tehnika, 1987
- [LAN63] Landau, L. D.; Lifșit, E. M., *Teoria Câmpului*, Editura Tehnică, București, 1963
- [LEE18] Lee, D., *Investigation of Physical Phenomena and Cutting Efficiency of Laser Cutting of Anode for Li-Ion Batteries*, APPL SCI-BASEL 8(2) 266, 2018
- [LEP17] LEPADATESCU, B.; **GIRDU, C. C.**, Universitatea Transilvania din Brașov, ISJ GJ, *Some Applications of CO₂ Laser in Industrial Engineering*, International Journal of Chemistry and Chemical Engineering Systems <http://www.ias.org/ias/journals/ijcces>, ISSN: 2367-9042, Volume 2, 2017
- [MAD22] Madic, M.; Petrovic, G.; Petkovic, D.; Antucheviciene, J.; Marinkovic, D., *Application of a Robust Decision-Making Rule for Comprehensive Assessment of Laser Cutting Conditions and Performance*, Machines/2022,10,153. <https://doi.org/10.3390/machines10020153>
- [MAD20] Madic, M.; Mladenovic, S.; Gostimirovic, M.; Radovanovic, M.; Jankovic, P., *Maximization of material removal rate in CO₂ laser cutting of mild steel*, Proceedings of the institution of mechanical engineers part b - Journal of Engineering Manufacture, doi: 10.1177/0954405420911529, 2020
- [MAS03] MAS C., These de doctorat, Modelisation physique du procede de decoupe de metaux par laser, Universite Pierre @Marie Curie, Paris, 2003
- [MIL20] Milesan, M.; **Girdu, C. C.**; Cirtina, L.; Rădulescu, C., *Mathematical Modelling Study of Hardox400 Steel Parts' Roughness and Hardness, Cut with CO₂ Laser*, Strojnicki Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering, doi: 10.5545/sv-jme.2019.6320, 2020
- [ORA19] Orazi, L.; și al., *Investigation on the Inert Gas-Assisted Laser Cutting Performances and Quality Using Supersonic Nozzles*, METALS, doi: 10.3390/met9121257, 2019
- [PAT11] Patel, J.M.; Patel, D. M., *Parametric investigation in CO₂ laser cutting Quality of hardox-400 materials*. Int J Eng Sci Tech 2011, 3, 5979-5984, 2011
- [PAT21] Patel, A.; Bhavsar, S. N., *Experimental investigation to optimize laser cutting process parameters for difficult to cut die alloy steel using response surface methodology*. Mat Today: Proc 2021, 43, 28-35, 2021

- [PAR17] Parthiban, A., *Optimization of CO₂ laser cutting parameters on Austenitic type Stainless steel sheet*, International Conference On Emerging Trends In Engineering Research, 2017
- [PLĂ77] Plăvițu, C., și al., *Fizică moleculară*, Editura Didactică și Pedagogică București, 1977
- [POC16] Pocorni, J.; Petring, D.; Powell, J.; Deichsel, E.; Kaplan, A. F. H., *The effect of laser type and power on the efficiency of industrial cutting of mild and stainless steels*, ASME. J. Manuf. Sci. Eng., 138(3), pp. 031012, 2016
- [POC18a] Pocorni, J.; Powell, J.; Frostevarg, J.; Kaplan, A. F. H., *The geometry of the cutting front created by Fibre and CO₂ lasers when profiling stainless steel under standard commercial conditions*. Opt. Laser Tech. 103, 318-326, 2018
- [POP75] Popescu, I. M.; și al. *Probleme rezolvate de fizica laserelor*, Editura Tehnică, București, 1974
- [POP00] Popescu, I. M. *Fizica și ingineria laserelor*, Editura Tehnică, 2000
- [PRA13] Prajapati, B. D.; Patel, R. J.; Khatri, B. C., *Parametric Investigation of CO₂ Laser Cutting of Mild Steel and Hardox-400 Material*. Int J Emerging Tech Adv Eng 2013, 3(4), 204-208, 2013
- [PUȘ07] Pușcaș, N., *Lasere*, Editura Academica, 2007
- [POW09] Powell, J., *Laser-oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction*, Journal Of Physics D: Applied Physics 42, 2009
- [SAH11] Sahin, A. Z.; Yilbas, B. S.; Ayar, T., *Laser cutting of ceramic and Thermal Efficiency Analysis*, 14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Edited by: Yigit F, Hashmi M S J, Book Series: Advanced Materials Research, 445 400-+, Istanbul, Turkey, Jul 13-16, 2011
- [SAV81] Savii, G., *Laseri*, Editura Facla, 1981
- [SEO19] Seong, Y. Oh.; Shin J. S.; Kim, T. S.; Park, H.; Lee, L.; Chung, C.-M., Lee J., *Effect of nozzle types on the laser cutting performance for 60-mm-thick stainless steel*, Optics and Laser Technology, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105607>, 2019
- [SHU18] Shulyatyev, V. B.; Orishich, A. M., (2018), *Microcraters and surface quality in laser oxygen cutting of thick steel sheets*, Journal Of Laser Applications, Volume: 30, 022003 Issue: 2, doi: 10.2351/1.5008798, 2018
- [STE88] Sterian, P. E.; Pușcaș, N., *Lasere și procese multifotonice*, Editura Tehnică, București, 1988
- [TEO65] Teodorescu, N.; Olaru V., *Ecuțiile Fizicii Matematice*, Vol II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1965
- [THO14] Thombansen, U.; Hermanns, T.; Stoyanov, S., *Setup and maintenance of manufacturing quality in CO₂ Laser cutting*, 2ND ICRM 2014 International Conference On Ramp-Up Management, Book Series: Procedia CIRP Volume: 20, Pages: 98-102, doi: 10.1016/j.procir.2014.05.037, 2014
- [URS86] Ursu, A.I.; Mihăilescu, I.; Prokhrov A. M.; Konov, V.I., *Interacțiunea radiației laser cu metalele*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1986
- [VLĂ83] Vlăducă, Gh., *Probleme de fizică pentru clasele XI-XII*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
- [WAR19] Wardhana, B.S.; Anam, K.; Ogana, R.M.; Kurniawan, A., *Laser Cutting Parameters Effect on 316L Stainless Steel Surface*, International Conference on Mechanical Engineering Research and Application (ICOMERA), vol.494, Art. No.: UNSP 012041, doi:10.1088/1757-899X/494/1/012041, 2019
- [ZHA20] Zhao, X., *Study on textured CBN grinding wheel by laser cladding*, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/s00170-019-04240-w, 2020
- [ZHO21] Zhou, H.; Zhou, H.; Zhao, Z.; Li, K.; Yin, J., *Numerical Simulation and Verification of Laser-Polishing Free Surface of S136D Die Steel*. Metals 2021, 11, 1-17, 2021