

# **OPTIMIZAREA INDUSTRIALĂ LA DECUPAREA CU FASCICUL LASER A TABLELOR DIN OȚEL**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea „Politehnica” din Timișoara  
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ  
de către

**ing. Petru - Valentin Glod**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Traian Fleșer  
prof.univ.dr.ing. Victor Ghizdavu  
conf.univ.dr.ing. Doru Luculescu  
prof.univ.dr.ing. Ion David

Ziua susținerii tezei: 21 octombrie 2010

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |                                             |
|------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică | 12. Ingineria sistemelor                    |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2010

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Decuparea cu fascicul laser este unul din procesele industriale cu largă răspândire pe plan mondial și cu o extindere tot mai mare în țară. În procesele de decupare cu fascicul laser, modelarea experimentală în scopul cunoașterii și controlului procesului este un subiect de actualitate deoarece, practic, problemele legate de condițiile de prelucrare și cele de material nu pot fi epuizate.

Decuparea cu fascicul laser aduce prin prezența simultană a proceselor de topire, vaporizare și evacuare de material, o serie de fenomene fizice a căror cunoaștere este importantă pentru controlul și optimizarea procesului de decupare cu fascicul laser industrial. Evaluarea fenomenelor fizice din cadrul planului experimental al prezentei teze de doctorat este însoțită de modelarea analitică.

Teza de doctorat „*Optimizarea industrială la decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel*” abordează două direcții de cercetare: una orientată asupra procesului de decupare cu fascicul laser și condițiile în care se poate realiza aceasta, iar cealaltă direcție este orientată asupra fenomenelor fizice care au loc în timpul procesului în condiții de aplicare efectivă industrială. Lucrarea demonstrează că cele două direcții de cercetare se întrepătrund prin programul de cercetare teoretică și experimentală. Astfel, sunt prezentate metode de cercetare în decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel. Se prezintă mai multe metode de analiză matematică a rezultatelor experimentale, semnificativ corelate între ele. Astfel se pun în evidență aspecte fenomenologice și tehnologice ale procesului de decupare cu fascicul laser. Studiul experimental al procesului de decupare cu fascicul laser propus în lucrare, permite evidențierea unor necesități elementare ale procesului tehnologic la decuparea cu fascicul laser și ale transformărilor induse în material, adiacent.

În cadrul cercetărilor experimentale s-a întrebuițat, fără restricție, sistemul tehnologic industrial Mazak 1500 W. Au fost efectuate 120 de decupări cu fascicul laser, cu modificarea parametrilor: presiune oxigenului  $pO_2$  [MPa], puterea medie  $P$  [W], viteza de tăiere  $v$  [mm/min], frecvența pulsurilor  $f$  [Hz], ciclul  $\eta$  [%] și distanța diuză-piesă  $ddp$  [mm], în limitele constructive și de siguranță acceptate de sistemului tehnologic întrebuițat.

Studiul prezentat poate servi ca bază de cunoștințe deosebit de importante și argumente bine fundamentate în domeniul decupării cu fascicul laser și generalizat, în prelucrarea cu fascicul laser a materialelor metalice.

Pe această cale doresc să mulțumesc domnului profesor univ.dr.ing. Alexandru Nichici, pentru sprijinul acordat la inițierea acestui proiect științific. De asemenea, doresc să mulțumesc ajutorului acordat în realizarea părții experimentale, domnului director general al S.C. „Compa” S.A. Sibiu, ing. Ioan Deac, domnului conferențiar univ.dr.ing. Eugen Cicală și domnului dr.fiz. Remus Boboescu.

Mulțumesc pentru sprijinul de care m-am bucurat pe parcursul activității din acești ani, colegilor din Catedra de Tehnologie Mecanică, departamentul Mașini Mecanice, Utilaje și Tehnologii din Facultatea de Mecanică.

Mulțumesc soției și întregii familii care, pe toată perioada de activitate, m-au sprijinit permanent, m-au înțeles și încurajat și m-au ajutat din toate punctele de vedere.

Dedic această lucrare soției și fiului meu Tudor-Valentin, la împlinirea primului an de viață și de fericire.

Timișoara, octombrie 2010

ing. Petru - Valentin Glod

### ***Soției și fiului meu Tudor-Valentin***

Glod, Petru-Valentin

#### **Titlul tezei**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 29, Editura Politehnica, 2010, 212 pagini, 159 figuri, 38 tabele, 73 ecuații/ formule, 103 referințe/ note bibliografice

ISSN:1842-8967

ISBN: 978-606-554-193-1

Cuvinte cheie: tăiere laser cu oxigen, laser cu CO<sub>2</sub>, oțel carbon nealiat, iradiere în regim pulsant, experiment factorial, modelare matematică, suprafața tăieturii.

Rezumat,

Se prezintă experimente în tăierea laser asistată de oxigen a tablelor din oțel carbon nealiat, folosind un sistem laser cu CO<sub>2</sub> cu iradiere în regim pulsant. Mai mulți parametri au fost modificați pe domenii experimentale largi. S-a studiat pe larg efectul presiunii oxigenului și al vitezei de tăiere. Au fost realizate modele matematice pentru modificarea lățimii tăieturii în vederea cunoașterii și optimizării procesului de tăiere. Calitatea tăieturilor obținute a fost cercetată prin analiza formei tăieturii, a durității și structurii materialului în zona tăieturii și a neregularităților care apar pe suprafața tăieturii. S-a prezentat bilanțul energetic pentru procesul de tăiere laser. S-au corelat condițiile de iradiere cu obținerea fazei topite în material și cu rezultatele experimentale, aplicate industrial.

# Cuprins

<b>Cuprins</b> .....	5
<b>Introducere</b> .....	8
<b>Lista cu notații, abrevieri și acronime</b> .....	13
<b>1. Aplicarea industrială a tăierii cu fascicul laser</b> .....	16
1.1. Evoluția sistemelor tehnologice laser.....	16
1.2. Caracteristici ale fasciculului laser utilizat la prelucrarea materialelor metalice .....	18
1.3. Sisteme tehnologice laser cu CO <sub>2</sub> .....	24
1.3.1. Principii constructive și funcționale.....	24
1.3.2. Componente ale sistemelor tehnologice laser.....	26
1.4. Utilizarea fasciculului laser la prelucrarea materialelor metalice.....	28
1.4.1. Principalele caracteristici ale frontului de tăiere .....	28
1.4.2. Dinamica gazului la frontul de eroziune .....	33
1.4.3. Dinamica procesului de decupare cu fascicul laser.....	35
1.5. Utilizarea oxigenului – gaz reactiv, la tăierea cu fascicul laser a oțelului .....	36
1.6. Abordări experimentale și teoretice ale procesului de decupare cu fascicul laser .....	39
1.6.1. Cercetări experimentale ale procesului de tăiere laser .....	39
1.6.2. Aspecte ale variației parametrilor pentru tăierea laser .....	44
1.6.3. Modelarea experimentală în procesele de tăiere cu fascicul laser .....	48
1.7. Aspecte tehnico-economice ale procesului de tăiere laser.....	50
1.8. Obiectivele cercetării doctorale .....	53
1.9. Concluzii.....	54
<b>2. Cercetări experimentale pentru tăierea cu fascicul laser</b> .....	57
2.1. Obiective ale cercetării experimentale proprii .....	57
2.2. Condiții experimentale generale .....	58

## 6 Cuprins

---

2.2.1. Sistemul tehnologic laser utilizat pentru programul experimental .....	58
2.2.2. Materialul procesat .....	62
2.2.3. Descrierea desfășurării programului experimental .....	62
2.3. Condiții experimentale particulare .....	63
2.4. Organizarea programului experimental .....	65
2.5. Tipuri de programe experimentale .....	68
2.5.1. Experimentări de tip clasic .....	68
2.5.2. Experimentări de tip factorial .....	68
2.6. Caracterizarea condițiilor de iradiere .....	74
2.7. Metode de analiză și evaluare a tăieturilor .....	79
2.8. Metode de modelare experimentală .....	80
2.9. Concluzii .....	83
<b>3. Elemente de modelare analitică ale procesului de decupare cu fascicul laser .....</b>	<b>86</b>
3.1. Obținerea transformărilor de fază la iradierea cu fascicul laser .....	86
3.1.1. Sursa termică produsă de radiația laser în material.....	86
3.1.2. Topirea materialului .....	89
3.2. Caracterizarea condițiilor de inițiere a procesului de tăiere cu fascicul laser .....	90
3.3. Modelarea variației lățimii tăieturii cu parametrii de proces .....	94
3.4. Efecte ale regimului de iradiere pulsant asupra tăieturii .....	96
3.5. Concluzii .....	103
<b>4. Cercetări privind analiza și optimizarea procesului de decupare cu fascicul laser .....</b>	<b>105</b>
4.1. Analiza seriilor experimentale de tip clasic .....	105
4.1.1. Analiza seriilor clasice cu poziționarea diuzei la 1 mm față de suprafața piesei .....	105
4.1.2. Analiza variației presiunii oxigenului combinată cu variația puterii medii și durata pulsului .....	110
4.1.3. Analiza variației vitezei de tăiere în condițiile unei iradieri cu pulsuri lungi la diferite presiuni ale oxigenului .....	114
4.1.4. Analiza efectelor produse de modificarea distanței dintre diuză și piesă .....	116
4.1.5. Concluzii privind rezultatele pe seriile experimentale clasice .....	120
4.2. Analiza variației funcțiilor obiectiv pe baza experimentelor de tip factorial .....	121
4.2.1. Modele matematice pentru planul factorial complet $2^5 E1$ .....	121

---

4.2.2. Analiza Diagramelor PARETO pentru planul factorial complet $2^5$ E1 .....	123
4.2.3. Analiza suprafețelor de răspuns pentru planul factorial complet $2^5$ E1 .....	128
4.2.4. Analiza planului experimental factorial incomplet $2^{5-2}$ E2 .....	138
4.3. Eficiența la îndepărtarea materialului .....	149
4.4. Definirea și analiza randamentului procesului .....	157
4.5. Analiza condițiilor în care procesul de decupare nu se realizează .....	170
4.6. Concluzii .....	171
<b>5. Evaluarea calității tăieturilor .....</b>	<b>174</b>
5.1. Evaluarea secțiunii transversale și starea suprafețelor tăieturii .....	174
5.2. Evaluarea liniarității tăieturilor .....	180
5.3. Clasificarea și compararea suprafețelor tăieturilor .....	187
5.4. Înclinația neregularităților micrometrice .....	192
5.5. Evaluarea durității materialului în secțiune perpendiculară pe suprafața tăieturii .....	195
5.6. Evaluarea rugozității suprafețelor tăieturilor .....	199
5.7. Evaluarea structurii materialului în zona afectată termic .....	200
5.8. Concluzii .....	202
<b>6. Concluzii și contribuții personale .....</b>	<b>204</b>
6.1. Analiza îndeplinirii obiectivelor cercetării doctorale .....	205
6.2. Contribuții personale în derularea și finalizarea cercetării doctorale .....	210
6.3. Perspective ale continuării cercetării științifice în domeniul tăierii laser asistate de oxigen .....	213
<b>Anexe .....</b>	<b>214</b>
A.1 – Tabele cu mărimi măsurate și calculate .....	215
A.2 – Metoda de analiză a variațiilor ANOVA .....	225
A.3 – Fotografii ale plăcilor cu tăieturile realizate .....	229
<b>Referințe .....</b>	<b>232</b>

## INTRODUCERE

Odată cu apariția primilor laseri s-a demonstrat posibilitatea folosirii fasciculului laser ca sursă termică utilă pentru diverse prelucrări. Dezvoltarea construcției surselor laser și creșterea puterii acestora a permis trecerea de la prelucrări cu caracter experimental la aplicații industriale pe scară largă. În prezent, procedeele de prelucrare laser se aplică tuturor tipurilor de materiale. O categorie aparte o constituie aplicațiile de tăiere, sudare și gravare în care se produce topirea, respectiv îndepărtarea unei cantități semnificative de material. Aplicarea acestor procedee se realizează în special la materialele metalice. Ca pondere în utilizarea materialelor metalice, primul loc îl ocupă oțelurile. Există astfel un interes deosebit pentru procedeele de prelucrare a oțelurilor. În procesul tehnologic în care un semifabricat este adus la formă finită, tăierea este prima etapă. De realizarea acesteia în condiții de precizie dimensională și cu o calitate corespunzătoare a suprafețelor, depinde de procedeele ulterioare care vor fi folosite în prelucrare.

Tăierea laser reprezintă procesul tehnologic în urma căruia se obține separarea a două piese folosind ca sursă termică fasciculul laser. Procesul de tăiere cu fascicul laser are două componente distincte și anume:

- obținerea unei transformări de fază a materialului iradiat;
- îndepărtarea acestuia.

După starea fizică a materialelor are loc tăierea laser de evaporare în care materialul este îndepărtat în stare de vapori, respectiv tăierea laser în care materialul este îndepărtat în stare lichidă. Îndepărtarea materialului are loc prin folosirea unui jet de gaz dirijat coaxial cu fasciculul laser. După natura gazului folosit se utilizează:

- tăiere laser cu un gaz neutru;
- tăierea laser în care se folosește un jet de gaz reactiv.

În cazul folosirii unui jet de gaz neutru (heliu, azot) acesta nu interacționează cu materialul topit având numai rolul de a îndepărta materialul. În cazul folosirii gazului reactiv (oxigenul) prin apariția reacției de ardere a fierului din oțel în oxigen, se dezvoltă în material o sursă termică cu o contribuție importantă datorită reacției chimice exoterme. Această reacție chimică aduce un aport energetic mult mai mare decât a fasciculului laser. Ea nu produce o sursă termică concentrată (cu densitate de flux termic mare), ceea ce determină contribuția ei să se manifeste prin topirea materialului.

Fasciculul laser asigură încălzirea materialului la temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$  -  $1200^{\circ}\text{C}$ , corelat cu oțelul pentru care este necesară inițierea reacției chimice de ardere a fierului în oxigen. Reacția chimică exotermă nu se poate autoîntreține datorită faptului că nu poate să reproducă temperatura de inițiere în materialul solid datorită suprafeței încălzite (și, în consecință, a densității mici de flux termic), astfel este nevoie de prezența fasciculului laser ca sursă de preîncălzire. Rezultatul este topirea, iar astfel, tăierea se realizează în zona de acțiune a fascicolului laser.

Principiul tăierii oțelurilor folosind arderea fierului în prezența unei surse de preîncălzire a fost aplicat cu mult înainte de dezvoltarea laserilor industriali în cadrul tăierii cu oxigaz. Folosirea laserului ca sursă de preîncălzire datorită dimensiunilor



reduse ale petei focale pe suprafața piesei, duc la economii de material și asigură posibilitatea realizării unor tăieturi de calitate. Fasciculul laser aduce procesul de tăiere de la un domeniu grosier la unul de precizie, în care se pot tăia contururi curbe exterioare și interioare ale piesei.

Dintre aplicațiile industriale ale tăierii laser în regim reactiv se menționează, cu precădere:

- folosirea în industria construcțiilor navale unde este necesară debitarea rapidă a tablelor;
- în industria constructoare de mașini se folosește la tăierea unor piese de serie (came, ghidaje, plăci de bază etc).

În baza celor menționate, progresele tehnologice și aplicarea industrială a procesării materialelor cu fascicul laser găsește domenii noi și aplicații tot mai extinse.

În Capitolul 1 – **Aplicarea industrială a tăierii cu fasciculul laser**, se prezintă evoluția sistemelor tehnologice laser, având la bază dezvoltarea teoriei și practicii fizicii, începând de la teoria ondulatorie a luminii astronomului a fizicianului olandez Cristian Huygens 1690, de la teoria electromagnetică a lui James Clerk Maxwell 1865, de la efectul fotoelectric al luminii pe baza teoriei corpusculare a luminii a lui Einstein 1905 și până la primul oscilator laser funcțional realizat de Theodore Maiman în mai 1960, la primul oscilator laser cu CO<sub>2</sub> construit de Kumar Patel în 1964 și primul oscilator laser cu CO<sub>2</sub> comercial realizat în 1966.

Sunt prezentate caracteristicile fasciculului laser utilizat la prelucrarea materialelor, precum *monocromacitatea, coerența, timpul de coerență, distribuția intensității*, respectiv *aria minimă* care poate fi iradiată pe suprafața piesei, definite și explicate cu relații matematice și însoțite de prezentări de schițe, desene sau fotografii. Sistemele tehnologice laser cu CO<sub>2</sub> sunt analizate din punct de vedere al principiilor constructive și funcționale și descrierea componentelor acestora. Utilizarea fasciculului laser la prelucrarea materialelor metalice, este un punct important al acestui capitol care tratează principalele caracteristici ale frontului de tăiere, dinamica gazului la frontul de eroziune și dinamica procesului de decupare cu fascicul laser. Se analizează totodată utilizarea oxigenului – gaz reactiv, la tăierea cu fascicul laser.

O atenție aparte este acordată aspectelor tehnico-economice ale procesului de tăiere, ponderea utilizării fasciculului laser industrial în procesele de decupare, avantajele și dezavantajele procesului, precum și costurile operaționale.

Pe baza celor prezentate, s-au putut defini obiectivele cercetării doctorale, ca elemente fundamentale bine definite, analizate pe cuprinsul întregii activități de cercetare științifică și îndeplinite în totalitate, în scopul optimizării procesului de tăiere cu fasciculul laser, îmbunătățirii calității suprafețelor tăieturilor, obținerii controlului energetic al procesului și realizării modelării analitice și experimentale a caracteristicilor tăieturilor.

În Capitolul 2 – **Cercetări experimentale pentru tăierea cu fasciculul laser** sunt definite obiectivele cercetării experimentale, ca bază de planificare, organizare, evaluare și evidență a întregii activități de cercetare experimentală, pentru studierea pe baze științifice a influenței parametrilor procesului de tăiere laser, urmărindu-se pe de o parte, punerea în evidență a condițiilor limită în care procesul este realizabil, iar pe de altă parte, întocmirea studiului procesului de tăiere, stabilindu-se ca finalitate, modele și interpretări asupra fenomenelor fizice care au loc în timpul procesului.

În acest capitol sunt prezentate, condițiile experimentale generale în care sunt specificate:

- sistemul tehnologic laser utilizat – caracteristici tehnice;
- schițe și fotografii;
- materialul procesat – compoziție chimică și caracteristici mecanice;
- descrierea desfășurării experimentelor, pe serii, în care factorii menținuți constanți au fost:
  - gazul asistent CO<sub>2</sub> cu o puritate de 99,8%;
  - diuza circulară cu un diametru de 1,2 mm;
  - lentila de focalizare a fasciculului a avut o distanță focală de 75 mm;
  - materialul iradiat S235 – SR EN 10025 (OL 37 – STAS 500/2) cu grosimea de 3 mm.
- prezentarea condițiilor experimentale particulare:
  - presiune oxigenului  $pO_2$  [MPa], este un parametru de proces, având o influență directă asupra vitezei gazului în tăietură și asupra reacției chimice de ardere a materialului;
  - puterea medie  $P$  [W], reglabilă direct pe instalație;
  - viteza de tăiere  $v$  [mm/min], viteza relativă de deplasare a capului laser față de piesa de prelucrat;
  - frecvența pulsurilor  $f$  [Hz], numărul de pulsuri pe unitatea de timp, reglabilă direct pe instalație;
  - ciclul  $\eta$  [%], raportul dintre durata pulsului și durata totală între două deschideri ale pulsului, reglabil direct pe instalație;
  - distanța diuză-piesă  $ddp$  [mm], distanța dintre capul laser și suprafața superioară a piesei de prelucrat,

Parametrii menționați sunt clasificați după influența asupra iradierii materialului, respectiv influența asupra procesului în general.

Se acordă o deosebită atenție organizării programului experimental prin: valorile mărimilor utilizate, respectiv derularea programul experimental. Structurarea programului experimental s-a realizat pe două tipuri de experimentări:

- experimentare clasică;
- experimentare factorială.

În toate cazurile studiate, pentru experimentele factoriale s-au reglat parametrii:

- puterea medie;
- viteza de tăiere;
- ciclul;
- frecvența de pulsare;
- presiunea oxigenului.

S-au determinat funcțiile de transformare directe și inverse, nivelurile factorilor de influență, matricea experimentului factorial complet  $2^5$  și matricea experimentului factorial incomplet  $2^{5-2}$ . Prin aceste determinări s-au obținut parametrii regimului pulsant, s-au evaluat condițiile de iradiere și s-au stabilit modalitățile de exprimare a condițiilor de iradiere. Se acordă atenția cuvenită metodelor de analiză și evaluare a tăieturilor, fiind detaliate:

- principiul de realizare a tăieturilor și poziționarea acestora,
- sistemele tehnice de determinare utilizate;
- metodele de modelare experimentală întrebuințate cu detalii, exemplificări prin schițe și imagini.

În Capitolul 3 – **Elemente de modelare analitică ale procesului de decupare cu fascicul laser**, este analizată cinetica transformărilor de fază la iradierea cu fascicul laser, luând în considerare teoria termică ca principal instrument în studiul cantitativ al fenomenelor care au loc la iradierea laser a materialelor metalice.

În acest capitol se descrie detaliat, sursa termică caracterizată prin densitatea de flux termic  $q$  [ $W/cm^2$ ] și produsă de radiația laser în material, unde interacțiunea dintre fascicul și material conduce la implicarea a două tipuri de surse termice: sursa termică la suprafață, respectiv sursa termică volumică, materializate prin topirea materialului, ca primă transformare de fază care apare în urma încălzirii materialului.

Un punct deosebit de important al acestui capitol îl constituie principalele aspecte ale procesului de decupare cu fascicul laser, modelate analitic, având ca probleme abordate:

- randamentul obținut la îndepărtarea materialului;
- calculul puterii de combustie la arderea fierului în oxigen;
- studiul câmpului termic și al tensiunilor în material;
- estimarea grosimii stratului de material topit;
- estimarea și optimizarea vitezei de tăiere;
- estimarea zonei afectate termic.

De asemenea, este prezentat modelul analitic pentru realizarea procesului de decupare cu fascicul laser. În cadrul optimizării valorilor vitezei de tăiere pentru decuparea cu fascicul laser asistat de oxigen se arată că viteza de tăiere este proporțională cu puterea fascicolului laser și invers proporțională cu densitatea materialului, aria secțiunii și căldura latentă necesară procesului.

În Capitolul 4 – **Cercetări privind analiza și optimizarea procesului de decupare cu fascicul laser**, se apelează la rezultatele experimentale proprii, corespunzătoare experimentărilor clasice prezentate sub formă de grafice, utilizând metoda de reprezentare cu funcții de regresie. Aceste funcții permit descrierea tendinței procesului, comparabilă cu alte rezultate experimentale și, în plus, asigură o funcție de corelație însoțită de un coeficient de corelație care acordă un nivel maxim de încredere.

Sunt prezentate analize ale seriilor clasice, cu poziționarea diuzei la 1 mm față de suprafața piesei:

- desfășurate pe durata a cinci serii experimentale S1-S5;
- analiza variației presiunii oxigenului combinată cu variația puterii medii și durata pulsului în cadrul seriilor experimentale S11-S13;
- analiza variației vitezei de tăiere în condițiile unei iradiere cu pulsuri lungi la diferite presiuni ale oxigenului în cadrul seriilor experimentale S14 și S15;
- analiza efectelor produse de modificarea distanței dintre diuză și piesă în cadrul seriilor experimentale S6 - S10.

Se prezintă totodată, concluzii în urma experimentelor efectuate și a rezultatelor obținute din graficele de dependență a lățimii tăieturii corelate cu parametrii menționați.

Un punct distinct și deosebit de important al acestui capitol îl constituie:

- analiza variației funcțiilor obiectiv pe baza experimentelor de tip factorial prin desfășurarea analizei planului experimental factorial complet  $2^5$  E1, realizându-se ierarhizarea factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia prin diagramele PARETO standardizate și

formulele de corelație rezultate între funcțiile obiectiv și factorii de influență;

- analiza planului experimental factorial incomplet  $2^{5-2}$  E2 în care numai una din condițiile experimentale a fost modificată, măbind distanța dintre diuză și piesă de la 1mm la 2mm și metoda corelației în produs pentru planul factorial incomplet  $2^{5-2}$  E2;
- analiza eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  funcție de raportul dintre energia liniară consumată în proces  $E_l$ , secțiunea prin tăietură  $A_s$  și randamentul procesului  $\varepsilon$  definit și analizat pentru dependența eficienței la îndepărtarea materialului, în cadrul seriilor experimentale S1-S5 și S11 - S15 precum și dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de variația presiunii oxigenului, vitezei de tăiere, frecvenței de pulsare și ciclului.

De asemenea, se face analiza efectelor condițiilor de iradiere asupra lățimii tăieturii și analiza condițiilor în care procesul de decupare nu se realizează.

În Capitolul 5 – **Evaluarea calității tăieturilor**, se analizează forma muchiilor tăieturilor și paralelismul suprafețelor tăieturilor plecând de la definirea raportului de paralelism și evaluarea liniarității tăieturilor.

Este prezentată clasificarea și compararea aspectului suprafețelor tăieturilor la care se remarcă fenomene ca:

- existența unui singur tip de neregularități micrometrice pe toată grosimea piesei;
- existența mai multor abateri de formă care se suprapun (oscilații) pe lungimea piesei;
- înclinarea neregularităților micrometrice raportate la suprafața tablei prelucrate.

De asemenea, se analizează înclinația și amplitudinea neregularităților micrometrice prin metoda măsurătorii fotogrammetrice și se desfășoară evaluarea durtății  $HV1$  a materialului în secțiunea perpendiculară pe suprafața tăieturii și dependența durtății pentru probele la care s-au modificat viteza de tăiere, frecvența de pulsare, puterea fasciculului laser, presiunea oxigenului și energia liniară. În partea de încheiere a acestui capitol sunt prezentate evaluările rugozității suprafețelor tăieturilor și evaluările structurii materialului în zona influențată termic ( $ZIT$ ).

În Capitolul 6 – **Concluzii și contribuții personale**, sunt prezentate principalele concluzii ale cercetării științifice doctorale, contribuțiile proprii fundamentate pe baza analizelor, evaluărilor și concluziilor cercetării experimentale, a modelelor matematice realizate și a rezultatelor obținute până în prezent la prelucrările industriale de decupare cu fascicul laser aplicate la S.C. „Compa” S.A. Sibiu, cu posibilități de extindere la toate firmele interesate de optimizarea industrială la decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel.

## LISTA CU NOTAȚII, ABREVIERI ȘI ACRONIME

$a$	- Difuzivitatea termică [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$A$	- Coeficientul de absorbție al radiației laser [-]
$Ad$	- Coordonata în profunzimea materialului de la suprafața tăieturii [mm]
$A_f$	- Suprafața frontului de eroziune [ $\text{mm}^2$ ]
$A_s$	- Aria secțiunii transversale prin tăietură [ $\text{mm}^2$ ]
$B$	- Strălucirea radiației laser [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
$c$	- Căldura specifică [ $\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$ ]
$d$	- distanța de deplasare a spotului laser pe suprafața piesei în timpul unei perioade [mm]
$D$	- Diametrul fasciculului laser nefocalizat [mm]
$ddp$	- Distanța diuză - piesă [mm]
$Du$	- Duritatea materialului [HV1]
$E$	- Energia pentru un nivel energetic al atomilor [J]
$E_l$	- Energia liniară [ $\text{J}/\text{cm}$ ]
$e$	- Grosimea tablei din oțel [mm]
$f$	- Frecvența [Hz]
$f$	- Distanța focală a lentilei [mm]
$h$	- Constanta lui Planck [J s]
$I$	- Intensitatea fasciculului laser [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
$J$	- Funcție arbitrară definită ca produsul dintre puterea de vârf și raportul spo [W]
$k$	- Conductivitatea termică [ $\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ ]
$L$	- Căldura latentă pentru o transformare de fază [J/g]
$L$	- ( $L_{\text{estimat}}$ ) Căldura latentă estimată pentru transformarea de fază indusă în material în anumite condiții de iradiere [J/g]
$L_0$	- Conținutul de căldură , caldura necesară pentru aducerea la temperatura de topire și topirea materialului [J/g]
$l_{\text{coh}}$	- Lungimea de coerență pentru radiația laser [mm]
$L_i$	- ( $L_{\text{inf}}$ ) Lățimea la partea inferioară a tăieturii [mm]
$L_m$	- ( $L_{\text{med}}$ ) Lățimea medie a tăieturii [mm]
$L_s$	- ( $L_{\text{sup}}$ ) Lățimea la partea superioară a tăieturii [mm]
$Ox, Oz$	Axele de mișcare ale sistemului cinematic
$P$	- Puterea medie a fasciculului laser [W]
$P_c$	- Puterea de vârf a fascicolului laser la iradierea în regim pulsat [W]
$P_{\text{cond}}$	- Puterea pierdută prin conducție în material [W]
$P_{\text{in}}$	- Puterea consumată pentru inițierea reacției de oxidare [W]
$pO_2$	- Presiunea oxigenului [MPa]
$P_{\text{out}}$	- Puterea reacției de oxidare [W]
$P_{\text{over}}$	- Puterea necesară supraîncălzirii topiturii [W]
$P_u$	- Putere utilă pentru realizarea tăieturii [W]
$Q$	- Eficiența la îndepărtarea materialului [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]
$q$	- Densitate de flux termic a sursei termice la suprafața materialului [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
$q_m$	- Densitatea de flux termic necesară pentru obținerea temperaturii de topire la suprafața piesei
$r$	- Raport de paralelism [-]
$R_a$	- Rugozitate medie pe suprafața tăieturii [ $\mu\text{m}$ ]
$r_f$	- Raza fascicolului laser [m]
$R_{\text{pal}}$	- Funcția de paralelism [-]

#### 14 Lista cu notații, abrevieri și acronime

---

$R_t$	- Rugozitate transversală pe suprafața tăieturii [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	- Rugozitate maximă pe suprafața tăieturii [ $\mu\text{m}$ ]
$S$	- Suprafața iradiată, pentru care are loc topirea materialului într-o simetrie cilindrică [ $\text{m}^2$ ]
$Sc$	- Suprafața de coerență pentru radiația laser emisă [ $\text{m}^2$ ]
$spo$	- Raportul „spot overlap”, de suprapunere a petelor produse de pulsuri consecutive pe suprafața piesei [-]
$t$	- Durata [s]
$T$	- Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{(0,t)}$	- Temperatura la suprafața piesei [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_c$	- Perioada pentru regimul de iradiere pulsat [s]
$t_i$	- Durata de interacțiune între radiația laser și material definit ca raportul dintre diametrul fascicolului laser și viteza de tăiere [s]
$t_p$	- Durata pulsului pentru iradierea în regim pulsat [s]
$t_r$	- Durata relativ de interacțiune, definită pentru toate condițiile de iradiere [s]
$u$	- Viteza de propagare a frontului de transformare de fază în material [m/s]
$u_h$	- Viteza de propagare a frontului de încălzire în material [m/s]
$v$	- Viteza de tăiere [mm/min]
$V$	- Volumul de material care participă la topire [ $\text{m}^3$ ]
$w$	- Raza fascicolului laser înainte de focalizare [m]
$w_f$	- Raza petei focale [m]
$z$	- Profunzimea menținerii fascicolului laser focalizat [mm]
$z$	- Distanța de penetrare termică în material [mm]
$z$	- Coordonata în direcția propagării fascicolului laser

#### **Simboluri grecești**

$\delta$	- Defocalizarea (distanța dintre planul focal și suprafața piesei) [m]
$\varepsilon_1$	- Randamentul de producere a tăieturii relativ la energia dată de fascicolul laser [%]
$\varepsilon_2$	- Randamentul relativ la inițierea reacției de oxidare în material [%]
$\varepsilon_3$	- Randamentul general de realizare a procesului de tăiere [%]
$\lambda$	- Lungime de undă a radiației laser [m]
$\eta$	- Ciclu durata pulsului/ perioadă pentru regimul pulsat [%]
$\theta_1$	- Unghiul de divergență [rad]
$\theta_0$	- Unghiul de divergență, pentru maximul principal
$\theta_{0.5}$	- Unghiul de divergență pentru scăderea la jumătate a valorii intensității
$\tau_{coh}$	- Timpul de coerență al radiației laser [s]
$\nu$	- Frecvența radiației emise de oscilatorul laser [Hz]
$\rho$	- Densitatea materialului [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Lambda$	- Lungimea de undă a neregularităților micrometrice pe suprafața piesei [mm]

**Notații :**

<i>S1 ... S15</i>	- Numărul seriei experimentale [-]
<i>F-Ratio</i>	- Raportul Fisher
<i>P-val</i>	- Probabilitatea , nivelul de încredere
<i>DF</i>	- Numărul gradelor de libertate
<i>R<sup>2</sup></i>	- Coeficient de corelație [-]
<i>R<sup>2</sup> (adj. for d.f.)</i>	- Coeficientul de corelație corectat pentru diferență
<i>ZIT</i>	- Zona influențată termic [mm]
<i>HV1</i>	- Duritate Vickers [N/mm <sup>2</sup> ]
<i>ICALEO</i>	- Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics

# 1. APLICAREA INDUSTRIALĂ A TĂIERII CU FASCICUL LASER

## 1.1. Evoluția sistemelor tehnologice laser

Apariția fasciculului laser a fost posibilă datorită dezvoltării teoretice și practice a fizicii. Astfel, astronomul și fizicianul olandez Cristian Huygens a propus în 1690 teoria ondulatorie a luminii. Conform acesteia, fiecare punct al frontului de undă acționează ca o nouă sursă de radiație având aceeași frecvență și fază. În aceeași perioadă, Newton propunea teoria corpusculară asupra luminii. Teoria ondulatorie asupra luminii a fost însă cea acceptată și a rămas ca bază de studiu până la începutul secolului XX. În 1865 James Clerk Maxwell a publicat teoria electromagnetică. Emisia undelor electromagnetice a fost pusă în evidență de către Hertz. Lumina a fost considerată o undă electromagnetică. În 1905 Einstein a explicat efectul fotoelectric al luminii pe baza teoriei corpusculare a luminii. El a introdus fotonul ca fiind corpusculul de lumină. Max Plank a propus teoria cuantică conform căreia emisia luminii are loc în cantități discrete numite cuante. Rutherford a propus modelul atomic, atomul fiind format dintr-un nucleu și învelișul electronic.

La acest concept Niels Bohr în 1913 a aplicat modelul cuantic. S-au cristalizat noțiunile de orbital geometric și nivel energetic. S-a arătat că fotonii sunt absorbiți de atomi ceea ce duce la creșterea energiei acestora. Scăderea energiei unui atom aflat într-o stare energetică ridicată revine în starea de bază prin emisie stimulată. Einstein studiind termodinamica radiației a arătat posibilitatea obținerii emisiei stimulate în cazul în care coeficientul de absorbție este negativ. Termenul de laser reprezintă acronimul expresiei „Light amplification by stimulated emission of radiation” [Ion, 2005].

Richard Tolman și Paul Erenfest au impus conceptul de „absorbție negativă” ca și cale de obținere a emisiei stimulate. Rudolph Landerburg în 1928 a observat dispersia negativă pentru descărcarea electrică în neon pe care a considerat-o o dovadă a emisiei stimulate. Realizat în 1940 prin noțiunea de „temperatură negativă” a descris inversia de populație. După 1950 au fost produse primele dispozitive Maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation). Towers a realizat în 1954 primul maser în SUA. În aceeași perioadă în URSS, Nikolai Basov și Alexander Prokorov au prezentat condițiile în care poate realiza un amplificator de microunde. În 1957 Scovil a realizat un maser cu mediu solid pe bază de ioni de gadoliniu. Apoi s-au realizat laseri cu ioni de crom. Ca și material gazdă pentru ionii de crom Ann Abor a folosit cristalul de rubin. Prin aceste cercetări s-a deschis calea obținerii de amplificatoare în domeniul infraroșu și vizibil.

Primul oscilator laser funcțional a fost realizat de Theodore Maiman în mai 1960. Acesta a fost oscilatorul laser cu rubin. A avut ca mediu activ un cristal de rubin de 1 cm diametru și 2 cm lungime. Pompajul optic a fost realizat cu o lampă în impulsuri cu xenon. Radiația obținută a fost de culoare roșie în regim pulsant. În decembrie 1960 Ali Javan a realizat primul oscilator laser cu gaz. Acesta a fost un oscilator laser cu He-Ne și a avut emisie în undă continuă în domeniul infraroșu. Pentru pompaj folosea descărcarea electrică în mediul gazos. White și Rigden au modificat construcția acestuia și au obținut emisia de radiație roșie. Oscilatorul laser



cu He-Ne a devenit primul oscilator laser comercial cu putere de 1mW. Acesta a fost folosit la instrumente de măsură și ca sursă pentru cititoarele codurilor de bare. Ideea de a folosi joncțiunile p-n ale semiconductorilor pentru a produce inversia de populație a apărut din 1950. Gunther Fenner a realizat primul oscilator laser cu semiconductor în 1962 folosind galium arsenidă. Primii oscilatori laseri cu semiconductor aveau ca mediu activ un singur material. Ei puteau opera numai la temperaturi scăzute. Tehnologia oscilatorilor laseri cu semiconductor a fost îmbunătățită de Kroemer în 1963 prin folosirea unui mediu activ și a unui mediu de acoperire. În 1969 Hayashi a realizat primul oscilator laser cu semiconductor care funcționa la temperatura camerei.

Primul oscilator laser cu CO<sub>2</sub> a fost construit de Kumar Patel în 1964. Acesta emitea în undă continuă. Construcția era de tipul „slow axial flow” (curgerea gazului axială lentă). Puterea inițială a fost de 1mW. Prin adăugarea de azot aceasta a crescut la 200 mW. Pentru un amestec de CO<sub>2</sub> cu aer s-a obținut o putere de 12 W. Puterea a fost crescută prin răcirea gazului la -60 °C și adăugare de heliu. Primul oscilator laser cu CO<sub>2</sub> comercial a fost realizat în 1966 și a avut o putere de 75 W. Acești oscilatori laseri erau accesibili companiilor puternice și armatei. Astfel s-au realizat oscilatori laseri cu CO<sub>2</sub> de mare putere, de 2,5 kW cu lungimea tubului de 54 m și oscilator laser de 8.8 kW cu lungimea tubului de 229 m. A devenit rapid evident că nu era practică creșterea puterii laserului numai pe seama lungimii tubului.

Laserii cu CO<sub>2</sub> de puteri mici au avut o dezvoltare la nivel mondial. S-a impus rapid introducerea unor noi soluții constructive pentru creșterea puterii. Deutsch în 1969 a introdus presiunea ridicată a gazului și răcire prin convecție. Tiffany în 1969 a introdus curgerea transversală a gazului „transverse gaz flow”. Beaulieu în 1970 a introdus excitația transversală, apoi a fost introdusă excitarea unor volume mari de gaz. În 1968 a fost realizat primul laser în designul „gaz dinamic” în SUA, acesta fiind capabil de puteri de zeci de kilowați. S-a realizat regenerarea gazului, astfel laserii cu CO<sub>2</sub> au putut fi realizați sub o formă compactă și integrați în diferite aparate, după anul 1972.

În perioada următoare s-au înregistrat progrese importante în ceea ce privește partea de optică și partea de robotică a sistemelor de prelucrare laser. Această dezvoltare a permis descoperirea unor noi aplicații. În 1970 a fost realizat primul oscilator laser cu Nd:YAG. Mai multe module au fost cuplate pentru a obține o putere de 1kW. După 1980 sursele laser cu CO<sub>2</sub> au crescut în putere. Aceasta s-a realizat datorită folosirii montajului cu curgere axială rapidă „fast axial flow” și cu curgere transversală. De asemenea s-a introdus excitația multikilowat RF. Sursele laser cu CO<sub>2</sub> au devenit astfel principalele surse laser folosite în industrie. După 1990 puterea oscilatorilor laseri cu Nd:YAG a crescut și au cucerit o parte din piață. Ei oferă posibilitatea transmiterii radiației prin fibră optică și o mai bună absorbție în cazul metalelor. Oscilatorii laseri cu CO<sub>2</sub> rămân însă cei mai utilizați la prelucrarea materialelor metalice.

Prima tăiere cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub> a fost realizată de Artur Sullivan la SERL, Baldock Marea Britanie, în mai 1967. Puterea laserului a fost de 300 W. Gazul asistent folosit a fost oxigenul. S-a utilizat montajul co-axial, lentila de focalizare a fost din clorură de potasiu iar pentru dirijarea fascicolului s-a folosit o oglindă acoperită cu aluminiu. S-a tăiat oțel cu grosimea de 1mm.

Procedeele de tăiere cu laser asistat de oxigen s-a dezvoltat în aceeași perioadă în Japonia și Germania. Prima aplicație industrială de succes în tăierea cu fascicul laser a fost realizată pentru piese din lemn la compania William Tyne folosind un oscilator laser produs de firma BOC cu putere de 200 W. Una din

probleme era controlul procesului datorită neomogenităților din lemn care modifică absorbția. În 1975 la compania Ford au fost tăiate părți din caroserie cu ajutorul unui fascicul laser cu CO<sub>2</sub> de 400 W iar în 1978 Ford a lansat primul automobil de serie care conținea părți tăiate cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub>. În 1990 s-au tăiat piese din oțel cu grosimi de 25 mm [Ion 2005].

## 1.2. Caracteristici ale fasciculului laser utilizat la prelucrarea materialelor metalice

Fasciculul laser reprezintă o sursă de radiație concentrată. Caracteristicile generale ale fasciculului laser sunt prezentate după cum urmează:

a) **Monocromacitatea**, frecvența emisă de oscilatorul laser este dată de diferența de energie între nivelele energetice între care are loc emisia radiației. Aceasta este dată de relația lui Planck:

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \text{ [Hz]} \quad (1.1.)$$

unde:  $h$  - constanta lui Planck

$E_2$  - energia nivelului superior [J].;

$E_1$  - energia nivelului inferior [J].

Cele două nivele energetice între care are loc emisia radiației laser sunt stabile. Astfel o singură frecvență este emisă și amplificată în cavitatea optică. Aceasta înseamnă că radiația laser are o singură lungime de undă. Aceasta înseamnă că radiația emisă de laser este monocromatică. Oscilatorul laser cu CO<sub>2</sub> emite radiație cu lungimea de undă de 10,6 μm.

b) **Coerența** este o corelație între câmpurile produse de două surse spațiale separate - coerență spațială, sau de aceeași sursă la momente diferite - coerență temporală. Când sursele sunt coerente intensitatea  $I$  care rezultă din suprapunerea câmpurilor într-un punct dat poate avea orice valoare între  $(\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$  și  $(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$  depinzând de diferența de fază. Când sursele nu sunt coerente, intensitatea  $I$  este suma celor două intensități  $I_1$  și  $I_2$  care reprezintă intensitățile celor două surse.

Relația între coerența spațială și temporală este:

$$l_{coh} = c \tau_{coh} \text{ [m]} \quad (1.2.)$$

Unde  $c$ -viteza de propagare a luminii în vid.

Aceasta înseamnă că dacă diferența de parcurs optic între cele două surse este mai mare decât  $l_{coh}$ , nu există nici o corelație între parametrii câmpului electromagnetic.

Timpul de coerență este durata în care pentru fiecare sursă diferența de fază nu se schimbă mai mult decât valoarea lui  $\pi$ .

" $\tau_{coh}$ " - gradul de monocromacitate este proporțional cu lățimea liniei.

$$\tau_{coh} \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \mu \text{ [s]} \quad (1.3.)$$

Pentru sursa laser „ $T_{coh}$ ” are valori cuprinse între  $10^{-2}$  la  $10^{-1}$  secunde, în timp ce pentru surse convenționale acesta este de  $10^{-8}$  [Rykalin, 1978].

c) **Divergența și direcționalitatea.** Propagarea radiației și direcționalitatea acesteia este descrisă de teoria difracției. Maximul intensității radiației este delimitat de unghiul de divergență.

În mediul activ al oscilatorului laser va fi amplificată numai radiația care se propagă pe axa cavității optice. Construcția cavității optice conduce la obținerea unei divergențe mici a fasciculului ceea ce înseamnă o direcționalitate ridicată. Pentru o radiație perfect coerentă spațial de apertură  $D$  va exista un unghi de divergență dat de teoria difracției. Unghiul de divergență este dat de relația :

$$\theta_d = \beta \cdot \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]} \quad (1.4.)$$

$\beta=1,1$  reprezintă un factor de proporționalitate.

Dacă radiația este parțial coerentă unghiul de divergență este mai mare, diametrul aperturii fiind înlocuit cu rădăcina pătrată a suprafeței de coerență.

$$\theta_d = \beta \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{Sc}} \text{ [rad]} \quad (1.5.)$$

d) **Strălucirea** unei surse de lumină se definește ca puterea emisă pe unitatea de suprafață și unitatea de unghi solid.

$$B = \frac{4P}{(\pi D \theta)^2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (1.6.)$$

Strălucirea maximă obținută în cazul în care radiația emisă este coerentă spațial.

$$B = \frac{4P}{(\pi \lambda \beta)^2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (1.7.)$$

Pentru un fascicul laser dat, apar importante aspecte referitoare la distribuția în timp și spațiu a intensității fasciculului laser, capacitatea fasciculului laser de a fi focalizat în spoturi mici, polarizarea fasciculului laser. Aceste aspecte vor fi analizate în continuare [Nichici, 2004].

În cavitatea optică emisia stimulată produce mai multe moduri electromagnetice. Importanță practică o au modurile electromagnetice transversale. Majoritatea oscilatorilor laser cu  $CO_2$  emit în modul electromagnetic  $TEM_{00}$ , fasciculul laser este caracterizat ca fiind monomod. Distribuția intensității fasciculului laser este una Gaussiană, secțiunea prin fasciculul laser este circulară. Intensitatea este maximă în centrul secțiunii și scade exponențial către marginile acesteia. Maximele secundare nu conțin mai mult de 2% din intensitatea maximului principal. Se definește unghiul de divergență  $\theta_0$  ca limita maximului principal. O altă definiție vizează scăderea intensității la 50% din cea a maximului principal, se introduce  $\theta_{0,5}$ :

$$\theta_0 = 2,44 \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]} \quad (1.8.)$$

$$\theta_{0,5} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]} \quad (1.9.)$$

Formulele anterior prezentate se deduc pe baza difracției Fraunhofer. Figura 1.1. prezintă formele teoretice produse de o suprafață circulară emițătoare. Această distribuție a intensității fascicului laser este caracteristică modului TEM<sub>00</sub> în care emit oscilatorii laser cu CO<sub>2</sub>.

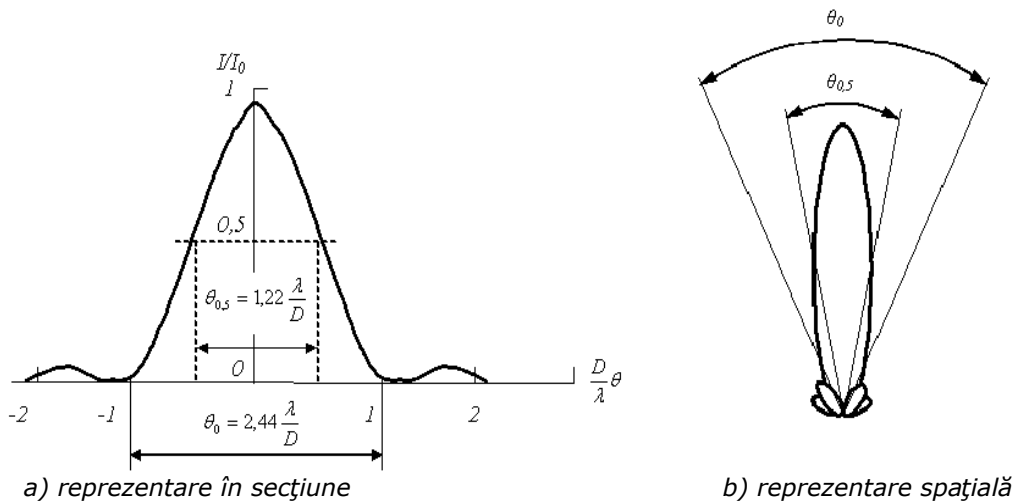


Figura 1.1. – Forma teoretică a fascicului laser produs de o suprafață emițătoare, după [Rykalin, 1978]

Aria minimă care poate fi iradiată pe suprafața piesei este caracterizată de raza spotului central al forme de difracție:

$$r_f = \theta f \text{ [m]} \quad (1.10.)$$

Pentru nivelul de 50% din intensitate:

$$r_f = 1,22 \frac{\lambda f}{D} \text{ [m]} \quad (1.11.)$$

Focalizând radiația laser coerentă, există următoarea distribuție a intensității în planul focal al lentilei:

$$I(r) = I_0 \left( \frac{2\mathfrak{S}_1(Br)}{(Br)} \right)^2 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.12.)$$

unde  $\mathfrak{S}_1$  funcția Bessel de prima speță și de ordinul 1, unde:

$$B = \frac{\pi D}{\lambda f} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (1.13.)$$

Intensitatea în centrul spotului laser este:

$$I_0 = \frac{\pi D^2}{4\lambda^2 f^2} P_0 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.14.)$$

unde:  $P$  - puterea emisă;

$D$  - diametrul fascicolului nefocalizat;

$f$  - distanța focală a lentilei de focalizare [Rykalin, 1978].

Despre caracteristicile fasciculului laser emis de laserul cu  $CO_2$  se poate aprecia:

- la focalizare se menține distribuția gaussiană a intensității fasciculului laser;

- distribuția spațială a intensității fasciculului laser se caracterizează printr-un maxim principal urmat de o scădere exponențială a intensității, distribuție gaussiană a intensității;

- raza fasciculului se definește arbitrar cuprinzând regiunea în care se află maximul până unde acesta scade la 50%. Există și alte abordări [Prohorov, 1980] care consideră scăderi mai puternice de „ $e$ ” ori sau „ $e^2$ ”. Aceste abordări trebuie legate de efectul termic considerat;

- fasciculele monomod pot fi focalizate în pete focale mai mici decât cele multimod. Fasciculele laser multimod prezintă un număr mare de maxime și minime în secțiune, acestea au o secțiune mai mare decât pentru cele monomod, intensitatea este medie este relativ constantă pe secțiunea fascicolului.

Pentru fasciculele circulare de tip  $TEM_{00}$  diametrul petei focale este determinat funcție de lentila de focalizare sau oglinda de focalizare, în timp ce puterea transportată este superioară de 2 kW. Diametrul fasciculului este de asemenea dependent de lungimea de undă  $\lambda$ , raza fasciculului „ $w$ ” înainte de focalizare. Raza „ $w_f$ ” a petei focale este:

$$w_f = \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot w} \quad [mm] \quad (1.15.)$$

Pentru fasciculul laser cu  $CO_2$  având un diametru de 19 mm și o distanță focală a lentilei de 127 mm, raza petei focale va fi de 0,045 mm, iar diametrul de 0,09 mm. Profunzimea zonei de interacțiune este intervalul care pornind de la punctul focal, fasciculul își conservă aproximativ intensitatea. El este definit de distanța la care dimensiunile petei focale variază cu un procent dat. Se poate calcula cu relația:

$$z = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \times w^2 \quad [mm] \quad (1.16.)$$

în care  $\rho$  = factorul de toleranță. Dacă diametrul nu depășește 10% din valoarea diametrului dorit  $\rho$  are următoarea valoare:

$$\rho = 1 + 0,10 = 1,10 \quad (1.17.)$$

Pentru un fascicul laser cu  $CO_2$  și o lentilă cu distanța focală 127 mm, zona de interacțiune (zona de paralelism a fasciculului) are mărimea următoare:

$$z = 2 \times 10,6 \frac{1}{\pi} \sqrt{1,1^2 - 1} \times \left( \frac{127}{19} \right)^2 = 0,14 \text{ [mm]} \quad (1.18.)$$

Se constată aproximativ (figura 1.2.), că pentru o reducere de două ori a petei focale, zona de paralelism este de patru ori mai mică. Aceasta are consecințe asupra tăierii materialelor groase. O distanță de focalizare mare oferă mai multe posibilități de reglare a procesului de tăiere în condițiile unei intensități scăzute [Chaussier, 2003].

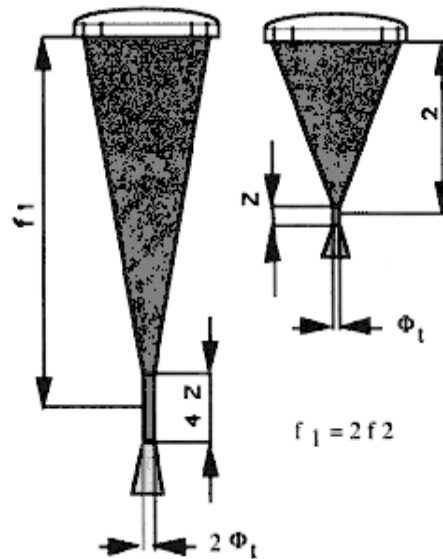


Figura 1.2. – Variația petei focale și a zonei de paralelism pentru o distanță focală înjumătățită, după [Chaussier, 2003].

Alături de distribuția spațială a intensității fascicului laser intervine și cea temporală. Astfel există iradiere în regim continuu și iradiere în regim pulsant. Folosirea unui regim de iradiere pulsant are avantajul creșterii intensității fascicului laser emis. Prin ciclul puls-relaxare se permite răcirea mediului activ. Modul de variație a puterii va da forma pulsului. Creșterea rapidă (instantanee) la intensitatea maximă urmată de același tip de scădere definesc pulsul dreptunghiular. Creșterea liniară urmată de scăderea liniară definesc forma triunghiulară. Creșterii bruște ale intensității urmate de scăderi mai puțin bruște definesc forma de „spike”. Pulsul laser este caracterizat de puterea de vârf  $P_c$  (peak power) și de distribuția spațială și în timp a intensității. Considerarea razei fascicului duce la definirea intensității maxime. Caracteristicile iradierii în regim pulsant vor fi pe larg analizate în Capitolul 3.

Transmisia fascicului laser către piesă pentru sistemele tehnologice laser cu  $CO_2$  se face prin transmiterea fascicului laser de la ieșirea pe oglinzi și ghidarea lui către suprafața piesei. Fasciculul transmis își păstrează distribuția Gaussiană.

Fasciculul emis de oscilatorul laser este liniar polarizat. Polarizarea liniară a fascicului laser este de două tipuri:

- raza  $P$  – câmpul electric este paralel cu planul incident;
- raza  $S$  – câmpul electric este perpendicular pe planul incident.

Majoritatea fasciculelor laser sunt polarizate liniar datorită modului de producere a lor în cavitatea laser.

Reflexia (coeficientul de reflexie) și coeficientul de absorbție pentru un material depind puternic de direcția „S” sau „P” de polarizare și de unghiul de incidență. Interacțiunea planului de polarizare a fascicului cu materialul, depinde de sensul de deplasare al fascicului. Raza polarizată „P” este puternic absorbită de material. Această proprietate este importantă deoarece absorbția radiației depinde de orientarea frontului de tăiere în raport cu această polarizare. Acestea conduc la consecințe direct observabile. Pentru unele direcții de polarizare tăietura este mai mare sau mai înclinată raportat la suprafața piesei. Din această cauză, aproape toate sistemele tehnologice laser cu  $CO_2$  polarizează circular fascicului înainte de focalizare.

O polarizare circulară a fascicului este o undă electromagnetică pentru care câmpul electric se rotește împrejurul axei de propagare cu o relație pe lungimea de undă „ $\lambda$ ”. Această polarizare elimină efectele nedorite descrise anterior. Ea se obține prin intercalarea unei oglinzi semitransparente tratate, pentru a produce o schimbare de fază de  $90^\circ$  între direcțiile câmpului electric. Transformarea unei raze circular polarizate în două raze liniar polarizate este prezentată în figura 1.3.

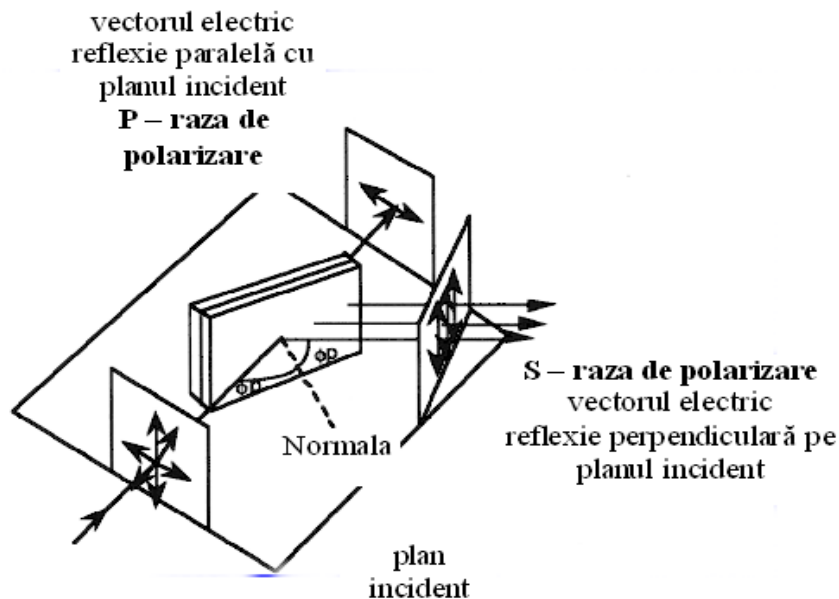


Figura 1.3. – Obținerea a două raze liniar polarizate din una circular polarizată, după [Chauussier, 2003].

Pentru tăierea cu fascicul laser se preferă un fascicul circular polarizat. În aceste condiții fascicului produce tăieturi de aceeași calitate în toate direcțiile de tăiere în detrimentul unei pierderi de putere în sistemul optic de schimbare a orientării vectorului câmpului electric. Se folosesc oglinzi care inversează polarizarea fascicului laser prin transformarea radiației din radiație liniar polarizată în radiație circular polarizată. Acestea sunt integrate în sistemul de transmitere a radiației la suprafața piesei.

### 1.3. Sisteme tehnologice laser cu CO<sub>2</sub>

#### 1.3.1. Principii constructive și funcționale

Mediul activ la sistemele tehnologice laser cu CO<sub>2</sub> este un amestec de gaze: CO<sub>2</sub> (6%), N<sub>2</sub>(20%), He (74%). CO<sub>2</sub> este gazul activ, moleculele acestuia emit radiații cu lungimea de undă de 10,6 μm datorită tranziției dintre două moduri de vibrație. Excitarea mediului activ este realizată prin descărcarea electrică în gaz. Sunt folosite următoarele tehnologii pentru construcția rezonatorului: mediu închis – se ating puteri până la 100 W, puteri mici; cu recircularea gazului – pentru care se pot atinge puteri mari. Există două tipuri de recirculare a gazului axială și transversală. Recircularea axială are loc pe direcția câmpului electric produs între catod și anod, iar recircularea transversală are loc pe o direcție perpendiculară pe aceasta. Curgerea axială lentă a gazului „slow axial flow” permite realizarea de puteri medii până la aproape de 1kW. Curgerea axială rapidă „fast axial flow” mărește pragul de putere până la câțiva kW. Curgerea transversală „transverse flow” a gazului permite realizarea de puteri de peste 10kW. În tabelul 1.1. sunt prezentate câteva caracteristici ale oscilatorilor laser. În toate cazurile este necesară înlocuirea periodică a gazului care reprezintă mediul activ deoarece acesta suferă transformări chimice care afectează capacitatea de a obține emisia stimulată a radiației.

Tabel 1.1. - Caracteristici ale oscilatorilor laseri cu CO<sub>2</sub>  
[Charchasan 1991]

Construcția	Puterea/ lungime tub [W/m]	Viteza gazului [m/s]	Puterea [W]
Curgere axială lentă	60 - 80	<5	50 - 900
Curgere axială rapidă	500	150	400-600
Curgere transversală	1000 - 2000	60	5000 - 45000

Oscilatorii laseri cu CO<sub>2</sub> a căror funcționare este în regim continuu, pot fi clasificați astfel:

- **oscilatori laseri cu CO<sub>2</sub> de putere mică (3-100W)**, pot fi de tip tub sau ghiduri de unde, iar radiația este de tip monomod transversal. Sunt utilizați la dispozitive de control, în scopuri științifice și medicale.

- **oscilatori laseri cu CO<sub>2</sub> de puterii intermediare (300-3000W)**. Pentru curgerea axială lentă se pot atinge 900 W. Radiația de obicei monomod sau apropiată de monomod, are diametrul fasciculului 6-20 mm, stabilitatea în putere ±2%, posibilitatea de modulare a fasciculului în regim pulsant cu diferite forme ale pulsului, divergența fasciculului 1-3 mrad (curgerea axială lentă presupune viteza gazului mai mică decât 5 m/ sec iar curgea rapidă presupune viteza gazului până la 150 m/s). Utilizarea principală este la prelucrarea materialelor.

- **oscilatori laseri cu CO<sub>2</sub> de mare putere (până la 100kW)**. Curgerea axială rapidă asigură puterii de până la 6 kW, iar curgerea transversală are puteri de 5 kW până la 100 kW. Utilizarea principală este la prelucrarea materialelor și în scopuri militare.

Oscilatorii laseri cu CO<sub>2</sub> în regim pulsant au energia pe puls, pornind de la ordinul mJ până la 100 J. Durata pulsului între 0.1 -10 μs, sub formă de spike



(maxim) urmat de o scădere. În general forma fasciculului este multimod cu o divergență de 3-10 mrad (figura 1.4.). Au aplicabilitate largă de la dispozitive de control, la prelucrarea materialelor precum și în aplicații militare.

Oscilatorii laseri cu CO<sub>2</sub> TEA („transversely excited atmospheric pressure” = excitație transversală la presiune atmosferică), sunt laseri care în tub au presiunea atmosferică. Majoritatea laserilor cu CO<sub>2</sub> au în tub presiune mai mică decât cea atmosferică. Presiunea ridicată face ca excitarea să conțină mari cantități de energie. În aceste condiții descărcarea electrică uniformă tinde să se transforme în descărcare în arc. Pentru a se preîntâmpina acest efect nedorit laserul operează în regim pulsant cu pulsuri scurte. Timpul pulsului este de ordinul microsecundelor iar puterea maximă (de vârf) atinge 1MW. Atracția față acest tip de laser se datorează faptului că este un dispozitiv de dimensiuni modeste care produce pulsuri de mare intensitate.

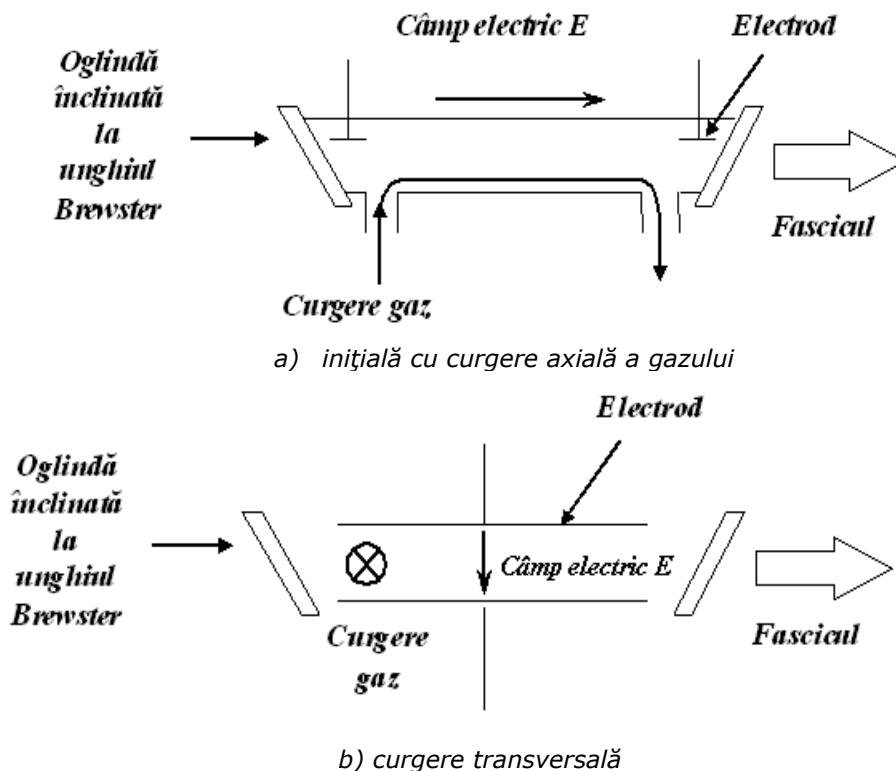


Figura 1.4. – Evoluția construcției oscilatorilor laseri cu CO<sub>2</sub> după [Charchasan 1991]

Oscilatorii laseri cu CO<sub>2</sub> „gaz dinamic” folosesc ca principiu de funcționare expulzarea gazului încălzit la temperatură mare printr-o diuză adaptată pentru curgerea supersonică. Prin scăderea temperaturii și presiunii moleculele de la nivelul superior se relaxează mai greu decât cele de la nivelul inferior. Se produce astfel o inversie de populație mai puternică decât cea realizată prin pompaj optic. Cavitatea optică este poziționată perpendicular pe curgerea de gaz. Atinge puteri de 100kW.

Acești laseri nu au pătruns în industrie deoarece soluțiile constructive și aplicabilitatea sunt deosebit de complicate [Charchasan, 1991].

### 1.3.2. Componente ale sistemelor tehnologice laser

Sistemul tehnologic laser este un utilaj tehnologic industrial complex de ultimă generație, care asigură producerea fasciculului laser și utilizarea acestuia în procese de prelucrare bidimensionale și tridimensionale de precizie. Sistemul tehnologic laser are următoarele componente (figura 1.5.):

- oscilatorul laser;
- sistemul de transmitere și focalizare a fasciculului laser;
- capul laser.

Pentru un oscilator laser cu  $\text{CO}_2$  construcția și funcționarea oscilatorului laser este redată în cele ce urmează. Elementele unui oscilator laser cu  $\text{CO}_2$  sunt:

- tubul de descărcare (care conține mediul activ);
- rezonatorul optic;
- sursa de alimentare cu energie electrică.

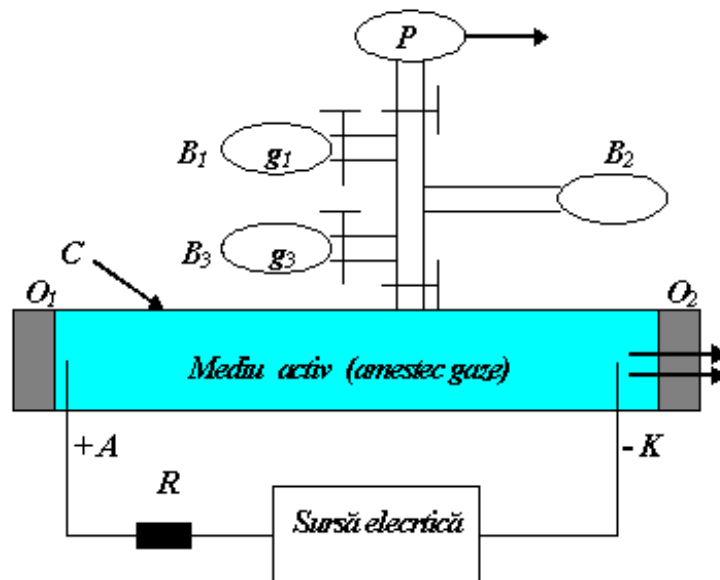


Figura 1.5. – Schema constructivă a unui oscilator laser cu  $\text{CO}_2$  după [Chryssolouris, 1990]

Mediul activ este constituit dintr-un amestec de gaze  $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$  și  $\text{CO}_2$  în proporțiile aflate în cilindru  $C$  închis la capete cu oglinzile  $O_1$  și  $O_2$ . Oglinda  $O_2$  este parțial transparentă, pentru extragerea fasciculului laser. Gazele care formează mediul activ se află în buteliile  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ . Cu ajutorul pompei de vid  $P$  se ajustează presiunile parțiale și finale ale amestecului. În anumite cazuri amestecul este realizat în prealabil și introdus într-o singură butelie, fapt care face manevrarea mult mai comodă. La fasciculul laser cu  $\text{CO}_2$  de putere medie se renunță complet la sistemul de umplere, laserul fiind închis (*sealed-off*) și cu amestecul la presiune optimă. În cilindru are loc o descărcare electrică între anod (+) și catod (-) datorată tensiunii electrice. Tensiunea electrică aplicată va da nivelul de excitație a mediului și în consecință, puterea emisă de laser. Transmiterea fasciculului la suprafața piesei

are loc cu ajutorul oglinzilor (figura 1.6.). Ca soluții constructive se întâlnesc următoarele:

- optică fixă, piesă în mișcare sub un cap de tăiere fix;
- optică mobilă, cap de tăiere în mișcare deasupra unei piese fixe;
- laser îmbarcat, deplasarea întregului laser deasupra unei piese fixe;
- optică mobilă, cap de tăiere în mișcare deasupra unei piese în mișcare.

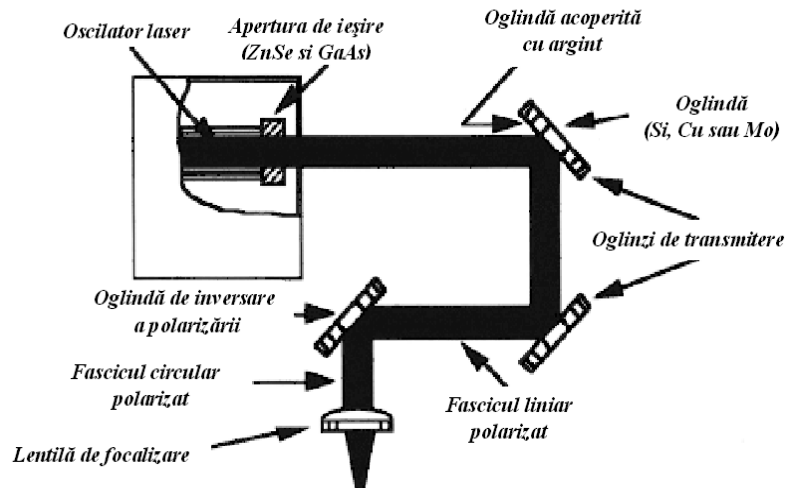
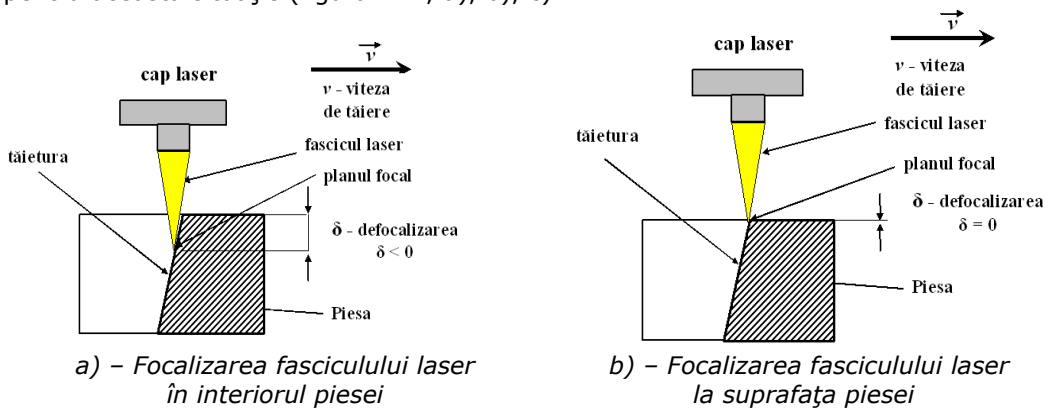
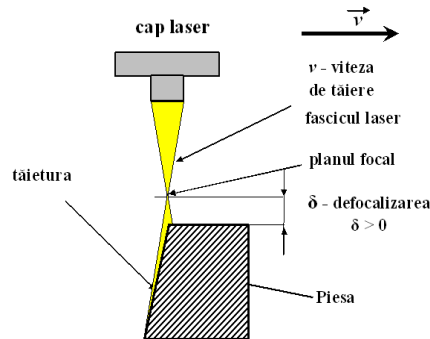


Figura 1.6. – Transmiterea fascicului laser către suprafața piesei după [Chaussier, 2003]

Transmiterea fascicului laser către suprafața piesei asigură poziționarea petei focale în raport cu suprafața piesei de prelucrat. Există trei cazuri importante pentru această situație (figura 1.7., a), b), c):





c) – Focalizarea fascicului laser deasupra piesei

Figura 1.7. – Focalizarea fascicului laser

În pata focală diametrul fascicului laser este minim. Aceasta înseamnă că intensitatea fascicului laser la suprafața piesei este maximă. Prin focalizarea fascicului laser în interiorul piesei sau deasupra acesteia va scădea intensitatea fascicului laser la suprafața piesei. Primul efect al acestei variații este acela al scăderii primului efect termic obținut și anume a posibilității de obținere a încălzirii materialului. Focalizarea fascicului laser în interiorul materialului asigură propagarea convergentă a radiației laser la frontul de tăiere. Prin prezența unor reflexii multiple crește cuplajul dintre radiația laser și material. Se asigură în cazul tăierii tablelor subțiri ca centrul de încălzire să se afle la mijlocul frontului de tăiere. Se măresc astfel șansele ca tăietura să penetreze piesa iar tăieturile obținute să fie drepte.

## 1.4. Descrierea procesului de tăiere laser

### 1.4.1. Principalele caracteristici ale frontului de tăiere

În cadrul procedurilor de tăiere, apelarea la fascicul laser definește un procedeu termic de îndepărtare a materialelor. În principiu, materialul solid se aduce sub formă de topitură sau vapori, iar apoi este îndepărtat cu ajutorul gazului asistent. Acesta are un rol dublu, de a ajuta la îndepărtarea materialului și de a proteja lentila de focalizare. O soluție tehnologică adusă în procesul de tăiere laser o constituie folosirea oxigenului ca și gaz asistent la tăierea oțelului. În acest caz apare, în plus, reacția de ardere a fierului din oțel, care aduce un aport energetic suplimentar.

La decuparea laser se deosebesc, după principalul efect termic produs de fasciculul laser asupra materialului, două tipuri principale ale proceselor de tăiere cu laser:

- tăierea laser cu dezintegrarea materialului (vaporizare, sublimare, descompunere chimică);
- tăierea laser cu producerea de topitură.

Tăierea cu fascicul laser asistată de oxigen se încadrează în cadrul proceselor de tăiere în care se produce topitură și în care îndepărtarea materialului se face sub formă topită. Procesul de tăiere laser are două părți distincte și anume:

- menținerea unui front de eroziune în material datorită laserului;

- îndepărtarea materialului topit (sau vaporizat, produșilor reacției chimice de descompunere) datorită gazului asistent (figura 1.8.).

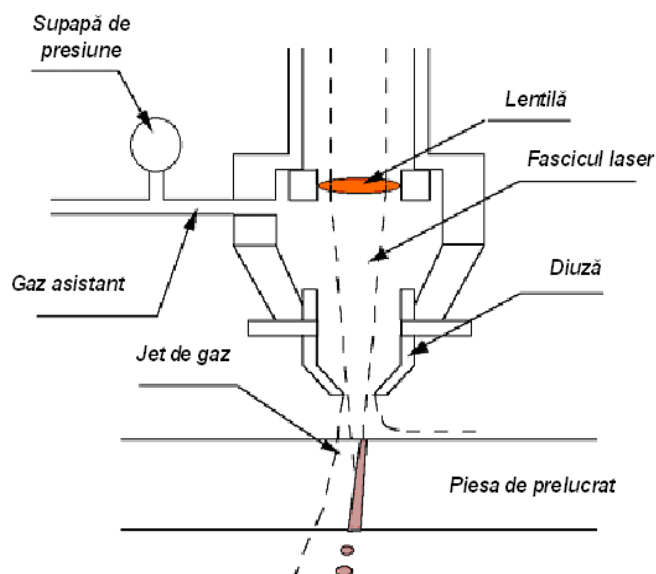


Figura 1.8. – Schema de principiu a sistemului de prelucrare laser folosit la tăierea materialelor metalice

Cele două fenomene, menținerea unui front de eroziune în material datorită fascicului laser și îndepărtarea materialului topit, din interacțiunea lor rezultă caracteristicile tăieturii. Sistemul tehnologic laser integrează transmiterea fascicului laser către piesă și a gazului asistent. Principalele elemente ale tăieturii realizate cu fascicul laser sunt prezentate în figura 1.9.

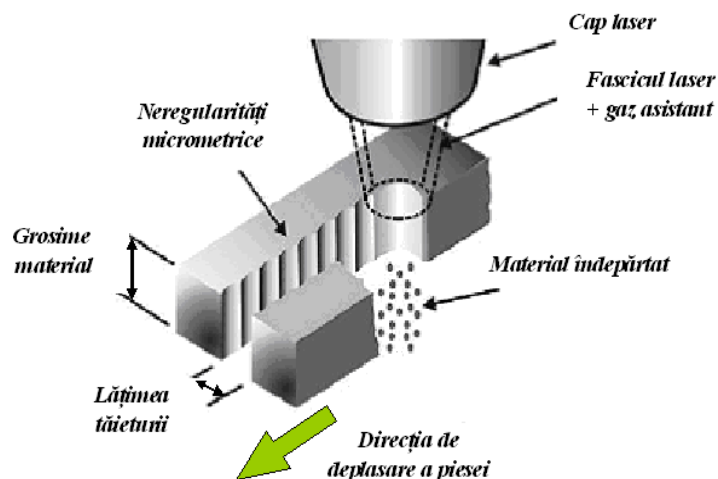


Figura 1.9. – Schema de principiu a procesului de tăiere cu fascicul laser, după [Ghany, 2005]

Prezența oxigenului ca și gaz asistent aduce ca element suplimentar în procesul de tăiere laser, prezența unei cantități ridicate de topitură. Reacția de ardere aduce un aport suplimentar de căldură. Acesta se manifestă prin posibilitatea de creștere a vitezei de tăiere.

Pentru tăierea laser a materialelor metalice se remarcă prezența interfeței solid-lichid numită și „frontul de topire” și respectiv prezența interfeței lichid-gaz, adică interfața dintre materialul topit și gazul asistent, vapori metalici, atmosfera înconjurătoare. Această interfață lichid-gaz, este numită „front de eroziune”.

Indiferent de caracterul neutru sau reactiv al gazului asistent, pentru metale tăietura prezintă următoarele zone (figura 1.10.):

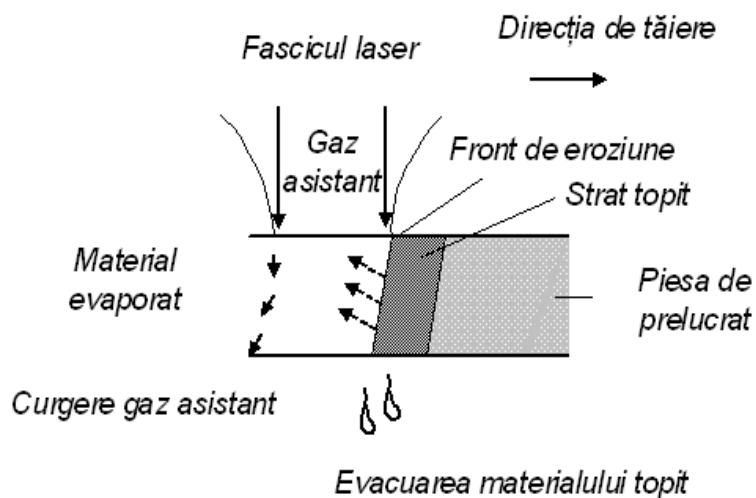


Figura 1.10. – Schema secțiunii longitudinale prin tăietură

- materialul solid netăiat;
- frontul de topire (interfața solid-lichid);
- frontul de eroziune (interfața topitură-gaz asistent cu eventuală prezența vaporilor);
- tăietura cu prezența neregularităților micrometrice pe margini.

Analiza frontului de tăiere este unul din principalele subiecte abordate în cercetarea proceselor de tăiere cu fascicul laser. Astfel s-au identificat trei zone diferite în material:

- a) zona de preîncălzire aflată înaintea fasciculului laser;
- b) zona de interacțiune, unde are loc topirea și îndepărtarea materialului (sau dezintegrarea acestuia), care conține în principal frontul de tăiere;
- c) zona din spatele fasciculului laser unde are loc curgerea topiturii, solidificarea și formarea neregularităților micrometrice.

Pentru fiecare din aceste trei zone se propune o modelare termică diferită.

Procesul de tăiere laser al materialelor metalice prin topire implică din punct de vedere fenomenologic, două etape importante:

- penetrarea materialului pentru fază topită;
- întreținerea frontului de tăiere în materialul supus prelucrării.

Penetrarea materialului iradiat este o precondiție pentru realizarea tăierii. Mai multe studii experimentale consideră realizarea unei găuri în material ca condiție pentru realizarea tăierii. Față de parametrii folosiți în aceste condiții singura diferență care intervine în alegerea parametrilor pentru procesul de tăiere este aceea a adaptării nivelului vitezei de tăiere. Penetrarea frontului de topire în material se realizează prin efectul cumulat al topirii cu cel al împingerii frontului de topire în material. Împingerea frontului de topire în material se datorează efectului cumulat al presiunii de recul datorate vaporizării cu cel al gazului asistent.

Pentru ca tăierea laser să se realizeze este necesar ca frontul de topire să fie întreținut pe toată grosimea materialului. Întreținerea frontului de topire nu este asociată numai indirect cu fasciculul laser. Important este ca acesta să asigure un gradient de temperatură suficient la interfață pentru ca să continue topirea materialului. Se consideră că atât direcția cât și viteza de topire ridicată contribuie la formarea neregularităților micrometrice la suprafața piesei. Acestea precum și evacuarea materialului și stabilizarea frontului de eroziune prin evacuarea topiturii sunt prezentate în figura 1.11. Direcția deplasării frontului de topire diferă de direcția de tăiere (figura 1.12. a). Acest lucru a fost arătat în mai multe studii teoretice și experimentale [Olsen, 1989]. De asemenea, dezvoltarea frontului de topire este mai rapidă decât cea a îndepărtării de material. O problemă separată o reprezintă înclinarea frontului de tăiere odată cu creșterea vitezei de tăiere. Aceasta se datorează reducerii timpului de iradiere a materialului (figura 1.12. b). Modelări bidimensionale și tridimensionale ale înclinării frontului de tăiere sunt prezentate în figura 1.13.

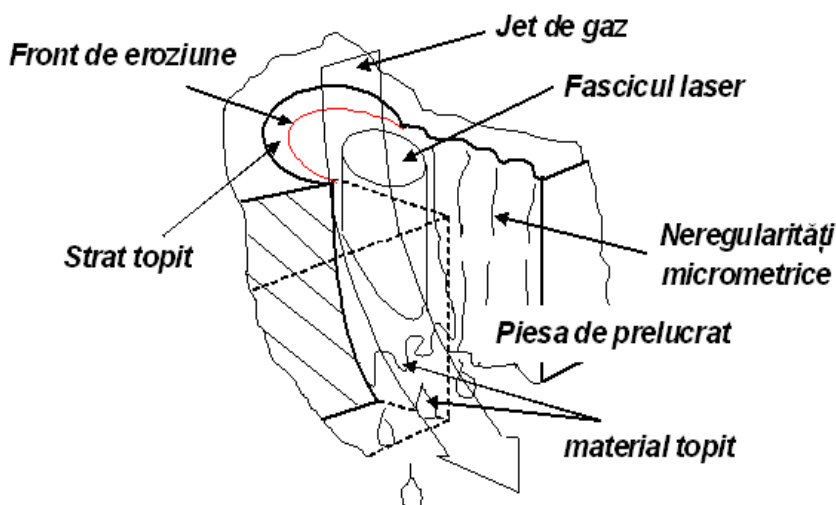


Figura 1.11. – Schema generală a frontului de topire, după [Olsen, 1989]

La îndepărtarea topiturii din tăietură și formarea frontului de tăiere este asociată menținerea topiturii în stare supraîncălzită, care îi asigură o vâscozitate scăzută și cu presiunea statică pe care o poate asigura gazul asistent deasupra topiturii. Creșterea vitezei de tăiere favorizează contactul dintre gazul asistent și topitură.

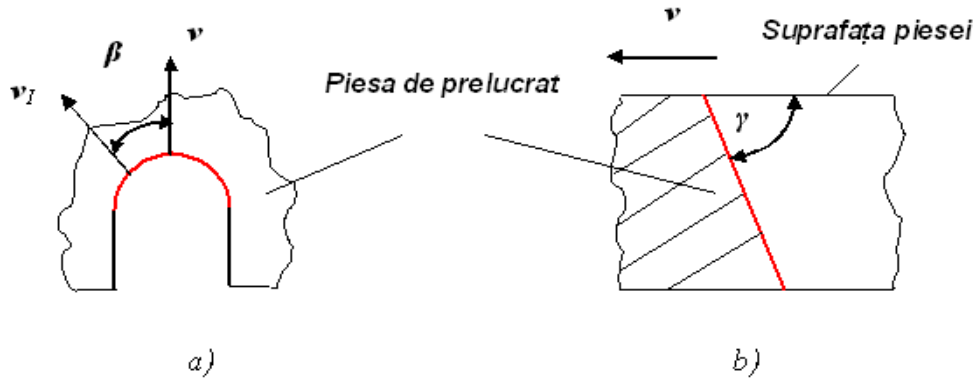


Figura 1.12. – Schema frontului de eroziune a) vedere de deasupra, b) vedere laterală  
 ( $v$  – viteza de tăiere,  $v_l$  – viteza frontului de topire,  $\beta$  – unghiul dintre direcția de tăiere și direcția de topire,  $\gamma$  – unghiul de înclinare a frontului de eroziune)  
 după [Olsen, 1989]

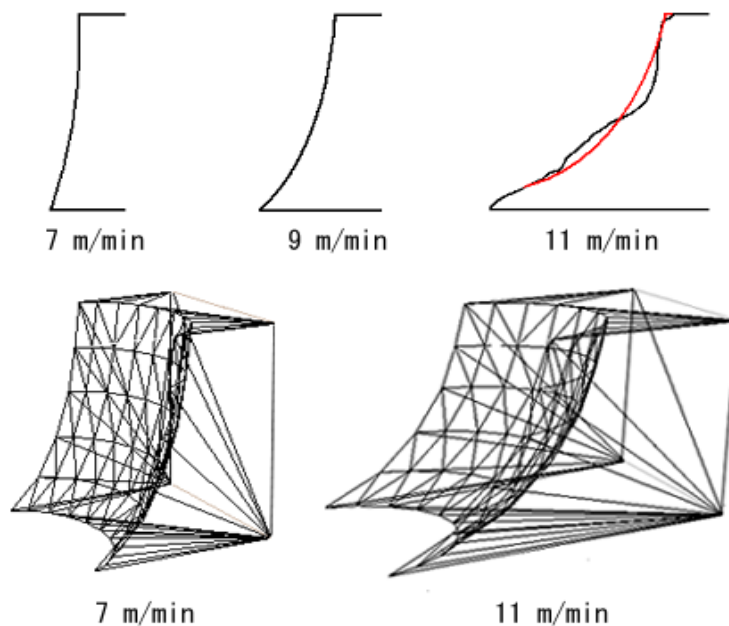


Figura 1.13. – Schema înclinării frontului de eroziune în funcție de viteza de tăiere,  
 după [Arai, 2004]

Pentru tăierea laser asistată de oxigen, dinamica fenomenelor care se au loc la frontul de tăiere este foarte rapidă, astfel că modelarea termică va lua în considerare aspecte generale ale procesului. Din acest punct de vedere se remarcă următoarele probleme:



- penetrarea materialului de către faza topită;
- găurirea materialului ca efect al topirii, vaporizării și gazului asistent;
- menținerea și propagarea frontului de tăiere în direcția de tăiere.

Principalele probleme legate de procesul de tăiere laser sunt:

- realizarea tăierii în condițiile unui sistem tehnologic dat și a unor parametri reglați dați. Aceasta înseamnă penetrare constantă a tăieturii într-un mod stabil și reproductibil;
- obținerea de suprafețe tăiate care să nu necesite prelucrări ulterioare;
- realizarea procesului de tăiere la viteze ridicate pentru a crește eficiența economică a acestuia.

### 1.4.2. Dinamica gazului la frontul de eroziune

În tăierea laser asistată de oxigen, gazul asistent are un rol triplu. Astfel acesta asigură îndepărtarea materialului topit din tăietură, întreține reacției de oxidare a materialului și protejează lentila de focalizare. În majoritatea cazurilor, jetul de gaz este transmis către piesă co-axial cu fasciculul laser. Acesta este montajul experimental cu jetul de gaz co-axial (figura 1.14.).

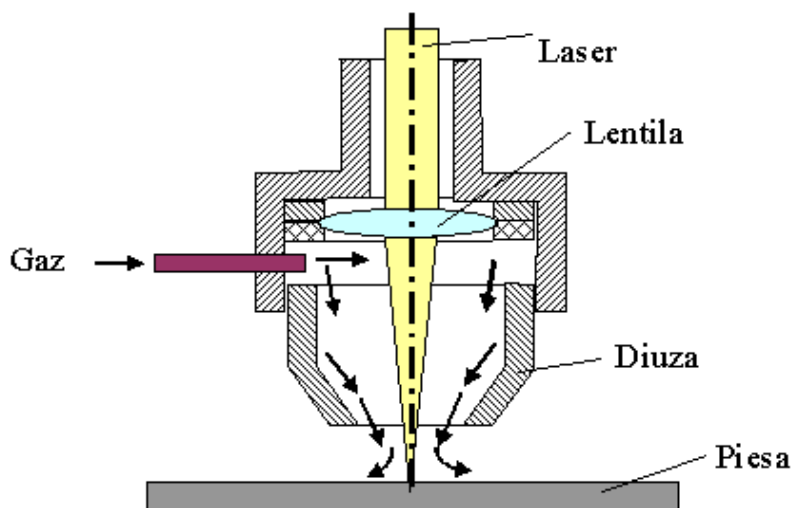


Figura 1.14. – Schemă de principiu pentru curgerea gazului coaxial cu fasciculul laser

În tăierea cu fascicul laser, un rol important îl are prezența jetului de gaz. Fie că este vorba de un gaz reactiv sau unul inert se ridică probleme de gazo-dinamică, astfel:

a) primul aspect considerat este eficiența jetului de gaz la frontul de eroziune. Aceasta înseamnă asigurarea unei presiuni suficiente pentru îndepărtarea materialului topit;

b) al doilea aspect constă în asigurarea unei toleranțe acceptabile a sistemului. După cum se cunoaște, distanța dintre diuză și piesă este foarte mică, de 1-4 mm. Este evident că presiunea la frontul de eroziune crește cu cât diuza este

mai apropiată, dar acest lucru scade toleranța sistemului necesitând ca distanțele să fie precis reglate;

c) al treilea aspect îl constituie asigurarea unei densități relativ constante în jetul de gaz pentru a evita (în cazul jetului co-axial) reflexia și împrăștierea radiației laser. Principalul parametru care guvernează propagarea gazului îl reprezintă raportul dintre presiunea gazului din rezervor și presiunea mediului înconjurător. Majoritatea modelelor consideră viteza de propagare a gazului subsonică iar în practică se folosesc viteze de curgere supersonice. Indiferent de viteza de curgere propagarea gazului are loc în bucle [Roca, 1998]. Aceste bucle sunt despărțite de „Normal shock disk”. Discul de șoc este o zonă cu densitate mare de gaz. Vitezele supersonice sunt caracterizate numărului lui Mack. În cazul vitezelor supersonice are loc apariția „Mack shock disk” ( M.S.D.). Acesta se deosebește de discul normal prin faptul că după formarea lui are loc o curgere laterală a jetului de gaz. Cu alte cuvinte gazul se împrăște și eficiența lui scade obținându-se tăieri de slabă calitate [Firet, 1987]. La suprafața piesei are loc formarea unei bucle sub M.S.D. care împiedică propagarea gazului.

În figura 1.15. este reprezentată grafic corelarea presiunii de tăiere  $P_0$  de M.S.D., funcție de distanța dintre diuză și piesă. Soluția evitării formării M.S.D. este folosirea de diuze lobate (figura 1.16.).

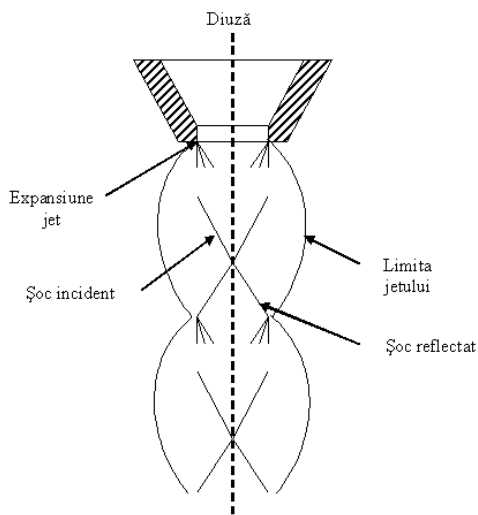


Figura 1.15. – Propagarea liberă a jetului de gaz după [Firet, 1987]

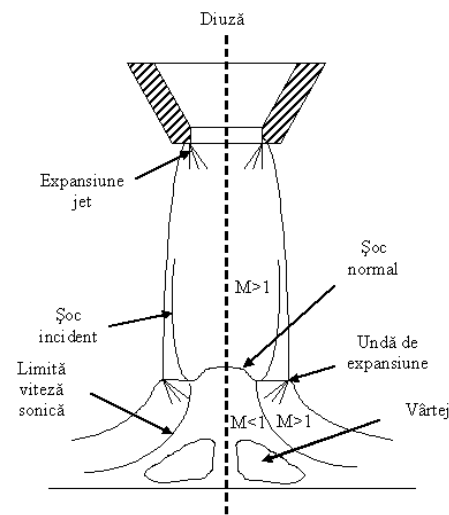


Figura 1.16. – Propagarea jetului de gaz la suprafața piesei [Firet, 1987]

Principalele probleme legate de jetul de gaz se referă la viteza acestuia. Există numeroase modelări pentru propagarea gazului și transferul de masă la viteze subsonice. Majoritate sistemelor tehnologice laser permit atingerea de viteze supersonice. Din punct de vedere teoretic se arată că propagarea gazului cu viteză supersonică este defavorabilă prin blocarea acestuia la suprafața tăieturii sau devierea jetului de gaz în tăietură. Practic sistemele tehnologice merg spre creșterea presiunii gazului și prin urmare, și a vitezei acestuia. Aceasta se explică prin faptul că presiunea gazului la suprafața piesei are o componentă statică și una dinamică. Blocarea gazului la suprafață crește componenta statică și o reduce pe cea

dinamică. Pentru a determina îndepărtarea de material trebuie considerate atât presiunea gazului la suprafața piesei cât și vâscozitatea topiturii.

Gazo-dinamica la frontul de tăiere este un subiect vast în modelarea proceselor de tăiere laser. Modelele consideră gazul dotat cu proprietăți ideale, o curgere laminară, expulzat de o diuză geometric perfectă. În practică, toate acestea nu se pot realiza simultan. Modelele pot fi ajustate sau corectate și ajută mai mult chiar la descoperirea factorilor care provoacă abateri de la situația teoretică. Modelarea acestor procese este un subiect deschis bazat pe mecanica fluidelor. Folosirea de diuze lobate pentru a asigura propagarea uniformă a gazului a fost prezentată în lucrarea [Elder, 1991], [La Rocca, 1998]. Modelări ale propagării gazului pentru tăierea laser sunt prezentate în lucrările [Chen, 2001], [Mai, 2002], [Man, 1997], [Man, 1998], [Guo, 2009].

### 1.4.3. Parametrii care caracterizează iradierea cu fascicul laser

Tăierea cu fascicul laser are loc la un anumit nivel al intensității fasciculului la suprafața piesei. Condiția necesară pentru realizarea tăierii laser, este ca valoarea intensității fasciculului laser la suprafața piesei să asigure propagarea frontului de vaporizare în material. Sunt importante corelațiile dintre valorile intensității fasciculului laser la suprafața piesei asociate cu timpii de interacțiune pentru realizarea proceselor tehnologice (tabelul 1.2.).

Tabel 1.2. – Intensități ale fasciculului laser și timpii de interacțiune pentru procesele tehnologice [după Ion 2005 și Charschan 1993]

Nr. crt.	Procesul tehnologic	Intensitatea fasciculului laser pe suprafața piesei [ $W/cm^2$ ]	Timpul de interacțiune [s]
1	călire (încălzire)	$10^2-10^3$	$10^{-2}-10$
2	acoperire (încălzire și topire de suprafață)	$10^2-10^4$	$10^{-1}-1$
3	topire	$10^4-10^6$	$10^{-4}-1$
4	sudare în regim de conducție	$10^4-10^5$	$10^{-3}-10^{-2}$
5	tăiere prin topire	$10^5-10^6$	$10^{-3}-10^{-2}$
6	sudare în regim keyhole	$10^6-10^7$	$10^{-3}-10^{-2}$
7	găurire, îndepărtarea de material prin vaporizare	$10^6-10^7$	$10^{-6}-10^{-4}$
8	prelucrări de suprafață	$10^7$	$10^{-7}-10^{-6}$
9	detonare în plasmă	$10^7-10^8$	$10^{-3}-10^{-2}$
10	unda de șoc	$10^8$	$10^{-7}-10^{-6}$

Pentru o propagare a jetului de gaz în condiții bune, viteza jetului de gaz crește cu creșterea presiunii gazului. În lucrarea [Ylbaz, 1998] s-au prezentat următoarele aspecte legate de rolul vitezei jetului de gaz la tăiere:

- valoarea intensității fasciculului laser la suprafața piesei pentru a realiza tăierea este independentă de viteza jetului de gaz la viteze de tăieri mici și grosimi

mici ale piesei. În aceste condiții grosimea stratului de material topit este mică și pierderile energetice în acesta prin întreținerea topituri sunt mici;

- grosimea stratului de material topit crește cu grosimea piesei și cu viteza de tăiere și scade cu viteza jetului de gaz;

- pentru o viteză de tăiere dată și o grosime a probei dată există o grosime a stratului de lichid de saturație, care tinde să se mențină constantă odată cu creșterea vitezei gazului. Cu alte cuvinte, există o viteză limită de eficiență a gazului. O creștere peste această limită nu produce o creștere a îndepărtării materialului;

- un nivel mai coborât al intensității fasciculului laser la suprafața piesei se folosește pentru grosimi mici ale piesei și viteze mari ale jetului de gaz.

### 1.5. Utilizarea oxigenului – gaz reactiv, la tăierea cu fascicul laser a oțelului

Tăierea materialelor printr-un procedeu termic poate fi ajutată de prezența unui gaz reactiv care alături de efectul de îndepărtare al materialului să susțină o reacție chimică exotermă care să aducă o contribuție energetică la frontul de eroziune. Folosirea oxigenului la tăierea prin topire a fierului se datorează unei conjuncturi favorabile de situații care fac posibil acest lucru. Astfel arderea fierului din oțel în oxigen degajă un număr de calorii suficient pentru ca să compenseze pierderile prin conducție, radiație și convecție și să încălzească produșii de reacție astfel încât să mențină local piesa la temperatura de amorsare a combustiei. Temperatura de amorsare a reacției trebuie să fie apropiată de temperatura de topire a metalului. Totodată, temperatura de topire a oxizilor formați trebuie să fie apropiată de temperatura de topire a metalelor astfel că produșii de reacție să fie tot în stare lichidă și să poată fi eliminați prin efectul cinetic al gazului pe măsură ce ei se formează. La temperatura de lucru oxizii produși pot fi solizi, lichizi sau gaz. Pentru prima stare se formează un ecran care împiedică contactul cu oxigenul și metalul se oprește de la ardere. Este cazul aluminei care se formează la suprafața aluminiului la tăierea termică a acestuia. Formarea unui produs de reacție gazos, de exemplu oxidul de carbon, este o frână. Pelicula gazoasă produsă la suprafață aderă la metal prin absorbție și îngreunează accesul oxigenului. Va polua oxigenul ceea ce va încetini combustia. Formarea oxizilor lichizi este propice propagării reacției. Aceștia au un rol catalizator. Oxigenul și metalul interacționează cu formarea oxidului, astfel că se produce combustia lor cu o mare intensitate, urmare unui contact molecular între ele.

Metalele și gazele care îndeplinesc aceste condiții care să facă posibilă folosirea unui gaz reactiv sunt limitate:

- fier în oxigen:  $2\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 270,8 \text{ Cal}$ ;
- cupru în clor:  $2\text{Cu} + 2 \text{Cl} = \text{Cu}_2\text{Cl}_2 + 70,8 \text{ Cal}$  ( $\text{Cu}_2\text{Cl}_2$  se topește la  $420^\circ\text{C}$ );
- staniu în clor:  $\text{Sn} + 4\text{Cl} = \text{SnCl}_4 + 129,6 \text{ Cal}$  ( $\text{SnCl}_4$  este lichid la temperatura ambiantă).

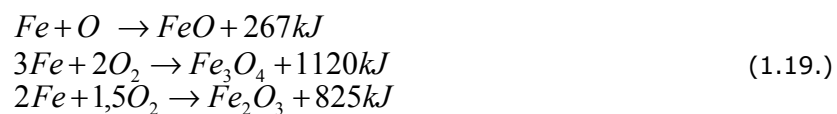
Tăierea cuprului și staniului folosind clorul pe rol de gaz reactiv nu poate fi realizată deoarece clorul este un gaz toxic.

În prezența oxigenului și fierul din oțel se oxidează lent la temperatura ambiantă. Pe măsură ce temperatura crește oxidarea se accelerează. Spre temperatura de  $1300^\circ\text{C}$  fenomenul devine cvasi-instantaneu. Această temperatură se numește temperatură de amorsare. Valoarea temperaturii de amorsare depinde

și de material. Este cunoscut faptul că peste valoarea temperaturii de 1000°C reacția de oxidare devine semnificativă iar la temperaturile de 1350°C sau 1400°C este practic instantanee. În unele cazuri se consideră valoarea temperaturii de 1200°C.

Oxizii de fier sunt în număr de trei: monoxidul de fier FeO, oxidul feritic sau peroxidul Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, oxidul magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Toți acești oxizi se formează cu o puternică degajare de căldură în timp ce reacția este rapidă. Pentru fiecare atom de oxigen fixat sub formă de oxid de fier se degajă 66 calorii. Astfel vom avea pentru cei trei oxizi următoarele valori pentru căldura de formare FeO 66 Cal (16 J), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 198 Cal (47 J), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 264 Cal (63 J). În tăierea laser asistată de oxigen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> este practic absent iar compoziția de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variază cu grosimea tăiată.

Reacțiile chimice de oxidare au următoarea formă [Ghany, 2005]:



Se estimează că temperatura frontului de tăiere este între 1950-2250°C. Reacția de oxidare pentru 1 mol Fe necesită o temperatură de inițiere a reacției de 1400°C și o căldură de inițializare a reacției de 275 kJ/ kg. Se observă că aceasta este mult mai mică decât cea obținută din reacțiile chimice. Acestea sunt date relativ la cantitățile de reactanți exprimate în moli. Reacțiile chimice de oxidare ale fierului au loc cu ambele tipuri de reactanți în exces. În realitate însă, cantitățile de reactanți variază deoarece fierul arde mai repede decât poate sursa laser să încălzească materialul.

Dintre elementele de aliere existente mai ales în oțelurile aliate inox care se oxidează și dau căldură suplimentară la frontul de eroziune se menționează: [Ghany, 2005]



Figura 1.17. prezintă frontul de eroziune pentru cazul în care se folosește în tăierea laser un gaz reactiv. La frontul de eroziune sunt marcate mai multe zone, după cum urmează:

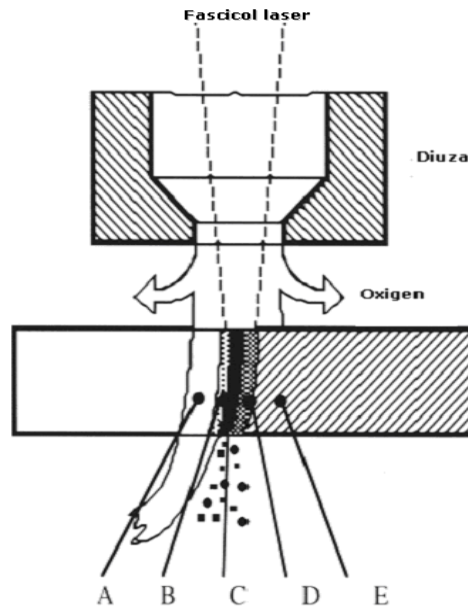


Figura 1.17. – Schema frontului de eroziune în tăierea laser cu oxigen a oțelurilor (Reacția de oxidare la frontul de eroziune: A – Jetul de oxigen; B – Prođuși gazoși datorăți arderii elementelor de aliere în special  $SO_2$ , stratul de oxigen poluat; C – Peliculă de oxizi de fier în stare lichidă lichizi; D – Peliculă de metal lichid; E – Metalul în stare solidă), după [Chaussier, 2003]

- în stratul „A” oxigenul curge în tăietură;
- în stratul „B” acesta se amestecă cu oxizii în stare gazoasă a elementelor de aliere;
- din stratul „B” oxigenul va difuza în stratul „C” unde are loc arderea propriu-zisă, iar capacitatea de difuzie va condiționa viteza de tăiere;
- stratul de material topit „D” avansează în interiorul materialului solid, iar variația grosimii acestui strat este principala cauză a instabilităților procesului.

Combustia are loc la partea superioară a tăieturii și produce în această zonă o încălzire constantă. Temperatura oxidului format este din ce în ce mai ridicată pe măsură ce el curge deoarece gradul său de oxidare crește prin trecerea de la  $FeO$  la  $Fe_2O_3$ . Se consideră că această creștere de temperatură ar fi principala cauză a înclinării neregularităților micrometrice pe suprafața tăieturii. Stabilitatea procesului și calitatea tăieturii necesită o concentrare de oxigen constantă și suficientă peste toată grosimea materialului tăiat. Măsurarea concentrației de oxigen la diferite profunzimi a arătat că pentru o grosime dată concentrația de oxigen crește cu diametrul diuzei utilizate. Creșterea diametrului diuzei provoacă turbulențe care afectează calitatea tăieturii, mărește gradientii de densitate din gaz și provoacă riscul instabilității punctului focal. Este recomandabil ca în cazul creșterii presiunii gazului la ieșirea din diuză, să se utilizeze concepții particulare de diuză (diuză cu cap plat, diuză cu loburi), care conferă jetului de gaz stabilitate și regularitate.

Un alt model al frontului de eroziune a fost interpretat de Ivanson (figura 1.18.). [Chen, 1998]. Acesta consideră în mod simplificat existența a patru zone. În zona de aprindere există fier solid, oxigen gaz și oxizi gaz, se presupune arderea fierului în stare solidă. Aceasta este urmată de o zonă de ardere unde se formează oxizii și de zona în care are loc îndepărtarea materialului (zona de extincție). Ca ultim fenomen considerat a fost zona de re-aprindere unde se obține un grad superior de oxidare.

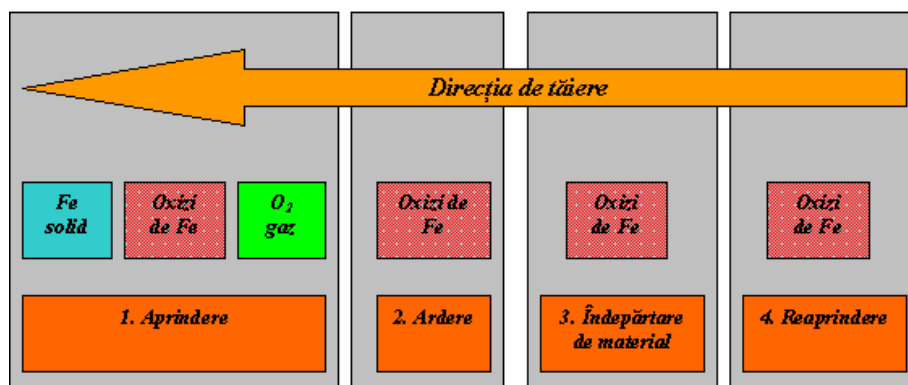


Figura 1.18. – Schema oxidării la frontului de eroziune

Cele prezentate anterior conduc la următoarea concluzie: contribuția reacției de oxidare poate fi estimată numai global pe proces. Este foarte dificilă definirea unei surse termice care să reprezinte căldura obținută în urma reacției termice de ardere a fierului. S-a apreciat că 60% din energia necesară tăierii este dată de reacția chimică. [Chen, 1999, b]

## 1.6. Abordări experimentale și teoretice ale procesului de decupare cu fascicul laser

### 1.6.1. Cercetări experimentale ale procesului de tăiere laser

Tăierea cu fascicul laser a tablelor metalice subțiri este un proces industrial larg răspândit. Limita superioară, ca viabilitate industrială și comercială, a grosimii piesei până la care se pot efectua decupări cu fascicul laser este de circa 15 mm. Necesitățile industriale cer creșterea grosimii pieselor de decupat. Problemele care se ridică sunt acelea legate de calitatea tăieturii. La grosimi mari calitatea tăieturilor scade deoarece apar bavuri și depuneri de material la partea inferioară a tăieturii, neregularitățile micrometrice devin foarte pronunțate mai ales la partea interioară a tăieturii și apar arsuri ale materialului în părțile laterale și la suprafață. Creșterea puterii conduce la riscul apariției arsurii materialului (reacția chimică între metal și oxigenul atmosferic). Scăderea vitezei de tăiere va însemna apariția unei curgeri puternice a topiturii. Aceasta înseamnă o slabă reproductibilitate a calității tăieturilor. La realizarea tăieturilor adânci stabilirea puterii și a vitezei de lucru devine dificilă. Pentru oțel mediu la grosimi mai mari de 10 mm se folosesc viteze de tăiere sub 0,6 m/min. În aceste condiții, apare diferită ca proces, tăierea laser a pieselor subțiri (până la 6 mm) față de tăierea laser a pieselor groase.

Principalul motiv care stă la baza dificultăților apărute la tăierea pieselor groase este acela că pierderile termice la frontul de tăiere cresc datorită reducerii vitezei de tăiere. Scăderea vitezei de tăiere apare ca și consecință a necesității topirii unei cantități mai mari de material. Ea atrage după sine creșterea conductivității datorită faptului că materialul este expus mai mult timp sursei termice. Mișcarea topiturii devine mai puternică. Acest lucru este benefic deoarece favorizează transmiterea căldurii în topitură. În topitură apare însă un puternic gradient de temperatură. Astfel topitura se răcește până a fi evacuată din tăietură și se solidifică formând bavuri. Îndepărtarea materialului de la partea inferioară a tăieturii devine nesatisfăcătoare, tăietura putând rămâne închisă. Mișcarea topiturii și solidificarea acesteia în condiții aleatoare are ca și consecință scăderea calității suprafețelor tăiate prin apariția de neregularități micrometrice pronunțate.

În lucrarea [Kanaoka, 1991] este prezentată tăierea laser folosind oscilator laser cu CO<sub>2</sub> în regim pulsant cu frecvență ridicată și timp de puls scăzut a unei piese groasă de 9 mm, folosind oxigen. S-a observat reducerea efectelor oxidării și un cuplaj mai bun al puterii de vârf decât în cazul tăierii în undă continuă.

În lucrarea [Fukaya, 1991] sunt prezentate probleme legate de calitatea fascicului laser. Ca rezultat al analizei s-a arătat că poate fi tăiat cu un fascicul laser cu CO<sub>2</sub> de 2kW oțel mediu cu grosimea de până la 20 mm având o bună calitate a suprafețelor.

În lucrarea [Molian, 1993] a folosit tehnica dublei focalizării (două fascicule laser fiecare cu putere de 1,5 kW, fascicul laser cu CO<sub>2</sub>). Comparativ cu tăierea cu un singur fascicul laser s-a arătat că pot fi crescute grosimea tăiată și viteza de tăiere fără a deteriora calitatea tăieturii. S-a realizat o modelare presupunând fasciculul laser ca producând o sursă termică liniară în material. S-a estimat viteza de tăiere și grosimea piesei în funcție de distanța dintre spoturi. Pentru oțel mediu s-au folosit valori ale vitezei între 10 in/ min și 90 in/ min asociate cu grosimi 0,25 in și 0,75 in;

În lucrare [Ilavarasan, 1995] s-a arătat că folosirea jetului de gaz în montajul off-axial extinde posibilitatea tăierii laser, obținându-se în aceleași condiții de iradiere ca și la folosirea montajului axial tăieturi cu o calitate a suprafețelor ridicată. Se poate crește, astfel, grosimea materialului tăiat și se poate extinde tăierea laser și la alte tipuri de materiale. Încălzirea datorată fascicului laser, reacției exoterme cu oxigenul și forța de frecare între gaz și stratul topit stabilesc viteza de îndepărtare a materialului. Principiul folosirii curgerii off-axiale a gazului este obținerea unei curgeri drepte și neturbulente a gazului la frontul de tăiere (care este înclinat). Aceasta maximizează producerea reacției exoterme și maximizează momentul în materialul topit. Astfel se obține o îmbunătățire a condițiilor de tăiere.

O problemă importantă în tăierea laser a oțelurilor groase o reprezintă îndepărtarea materialului din tăietură. Dacă presiunea oxigenului este prea scăzută are loc resolidificarea metalului și formarea bavurilor. Dacă presiune oxigenului este prea ridicată marginile tăieturii vor fi arse. [Heidenreich1, 1996] a modelat curgerea gazului folosind teoria curgerii stratului limită a lui Prandtl. Modelul descrie limitele superioară și inferioară pentru viteza gazului și lățimea tăieturii ca funcție de grosimea piesei în condițiile unei curgeri stabile a topiturii și o ardere controlată a metalului.

[Geiger, 1996], a studiat influența poziției focarului la tăierea unor piese de până la 16 mm grosime. În general în tăierea laser poziția focarului se află în interiorul piesei. Pentru tăierea pieselor groase focalizarea în interior devine un lucru obligatoriu, poziția focarului aflându-se la câțiva milimetri în interiorul piesei. Autorul propune variația acestei poziții în timpul procesului printr-o mișcare relativă



pe verticală între capul laser și piesă. Se obține astfel ca rezultat al deplasării capului laser pe orizontală și pe verticală, o deplasare a focarului după o sinusoidă.

În lucrarea [Nagels, 2007], se studiază influența conținutului de sulf din oțel asupra procesului de tăiere cu fascicul laser. În experimente s-a folosit un fascicul laser cu CO<sub>2</sub> cu putere maximă 6 kW. Fasciculul caracterizat de factorul de calitate  $K = 0,22$ . Tabla de prelucrat a avut 22 mm grosime. Regimul a fost pulsant, cu valori pentru putere 4,5 - 6 kW/ ciclul 70 % de unde a rezultat o putere medie estimată între 3,5 - 4,2 kW. Presiunea oxigenului a variat între 0,3 - 0,9 bari. S-au efectuat experimentele asupra a două tipuri de oțel convențional notate cu LS (conținut scăzut de sulf 0,005 %), respectiv HS (conținut ridicat de sulf 0,06%). S-a observat că la conținut de sulf scade puternic tensiunea superficială și vâscozitatea. Astfel se influențează convecția Maragoni la suprafață. O topitură cu vâscozitate și tensiune superficială scăzută este ușor de îndepărtat din tăietură. Numărul de neregularități micrometrice crește pe măsură ce formarea gazului crește: LS=36 - 52 neregularități micrometrice/ cm și HS=34 - 41 neregularități micrometrice/ cm.

Se formulează următoarea explicație: în primul pas are loc oxidarea. Materialul este încălzit peste o anumită temperatură (1200°C) și începe din nou oxidarea. Oxidarea va da energia necesară pentru topire. Frontul de topire se propagă mai repede decât fasciculul laser și oxidarea încetează.

S-au studiat efectele folosirii unei presiuni ridicate a oxigenului. Consecințele posibile ale presiunii ridicate a oxigenului sunt următoarele:

- presiunea ridicată va produce oxidarea la temperatură scăzută astfel ca o cantitate mai mică de material să fie topită (procesul merge în pași mărunți - explicația suferă deoarece temperatura de inițiere a procesului este de bază);

- a doua explicație, este că efectul de răcire este mai mare cu cât presiunea gazului este mai mare, lucru care încetinește propagarea frontului solid-lichid.

Rugozitatea suprafețelor tăieturilor a variat între (Rz: 11 - 22 μm) pentru LS și (Ra: 11 - 32 μm) pentru HS. Punctele devin centrul domeniului experimental prezentând valori minime ale presiunii oxigenului asociate cu puteri extreme, cresc rugozitatea suprafeței tăieturii în material.

Prezența sulfului determină modificarea tensiunii superficiale a materialului topit. Acestea conduc la curgerea Maragoni. Lichidul curge din zona cu tensiunea superficială scăzută în zona cu tensiunea superficială ridicată. Pentru oțelul cu S maximul de tensiune superficială este mutat odată cu maximul de temperaturi. În baia de topitură, gradientul de temperatură există între centru și părți. Gradientul de temperatură cauzează un gradient în tensiunea superficială. Când temperatura este sub temperatura critică - topitura curge din părți spre centru și invers. Când curgerea are loc către margini, apare lărgirea băii topite. Astfel pentru LS apar arderi la partea inferioară și depuneri de bavuri (fier topit neoxidat).

În lucrarea [Salem, 2008] s-a studiat tăierea laser folosind oxigen a tablelor subțiri cu conținut scăzut de carbon. În experimentări s-a folosit laser Nd:YAG în regim continuu, viteze de tăiere 700 - 1500 mm/ min, puteri de 337 - 515 W, presiunea oxigenului 3,5 - 5 bari, grosimea tablei de 1,25 mm, conținutul de C < 0,012 %. S-a urmărit grosimea zonei afectate termic și duritatea VHN, (HV). În urma cercetărilor s-au desprins următoarele concluzii:

- pentru o putere laser dată, o creștere a presiunii oxigenului nu mărește oxidarea. Este necesară o presiune peste un anumit nivel, pentru îndepărtarea oxizilor topiți care aderă la partea inferioară a tăieturii;

- lățimea ZIT crește odată cu creșterea puterii și scade cu creșterea vitezei și presiunea gazului. Se observă fluctuații datorită fluctuațiilor în gradul de absorbție al fasciculului laser;

- lățimea stratului de oxid crește cu creșterea puterii și scade cu creșterea vitezei datorită scăderii timpului de expunere la oxidare;

- duritatea materialului la distanțe paralele cu muchia tăiată, crește odată cu creșterea puterii și scade direct proporțional cu viteza, rămânând în jurul celei a materialului de bază cu creșterea presiunii gazului la 5,5 - 6 bari. Prezintă fluctuații datorită interacțiunii între parametrii.

- mărimea *ZIT* este puternic afectată de presiunea  $O_2$  datorită formării bavurilor existente la partea inferioară a tăieturii.

Stratul de oxid nu e afectat de puterea fascicului laser, dar e afectat de presiunea  $O_2$ . Se recomandă ca și condiții optime pentru tăierea unor grosimi de material de 1,2 mm, utilizarea unei puteri  $P = 337$  W cu viteze între 1000 - 1500 mm/min și presiunea gazului de 5 bari.

În lucrarea [Shony, 1997] se studiază tăierea unor table din oțel nealiat, de grosime 3 mm folosind un fascicul laser cu  $CO_2$  de putere 2kW care a funcționat în TEM<sub>01</sub>. Oxigenul la presiuni de 10 bari și viteze de tăiere de 40 mm/sec, a condus la tăieturi cu aderențe atât la puteri de 0,6 kW cât și la puteri de 1,4 kW. Arderea pe margini este puțin mai redusă la 1,4kW la partea superioară, însă aderențele sunt semnificative (defavorabile la 0,6 kW față de 1,4 kW). Mărimea bavurilor a fost de 0,8 mm. Viteza de tăiere a variat de la 40 la 120 mm/sec. Tăietura a devenit mai mică odată cu creșterea vitezei. Lățimea tăieturii cu o viteză de 120 mm/sec este de 0,4 mm, arderea la suprafață este mică dar calitatea tăieturii este scăzută (nepenetrată).

Rugozitatea suprafeței a fost de de 60  $\mu$ m. Aceasta nu este acceptabilă comparativ cu rezultatele pentru tăierea cu gaz inert sau cu tăierea la presiune joasă. S-a observat deteriorarea calității suprafețelor tăieturii odată ce presiunea gazului depășește valoarea de 2 bari. Presiunea ridicată a gazului folosit la 2 bari permite creșterea vitezei de tăiere de la 50 mm/sec la 110 mm/sec adică practic debitarea materialului. Folosind ca și gaz de lucru aerul la presiunea de 6 bari și viteza de 35 mm/sec s-a obținut o lățime a tăieturii de 0,29 mm.

În lucrarea [O'Neil, 2000] se analizează tăierea unor secțiuni de până la grosimea de 50 mm folosind un fascicul laser cu  $CO_2$  de 2 kW. La arderea fierului din oțel este necesară o temperatură de aproximativ 1000°C. Cea mai mare cantitate de oxid produsă o reprezintă FeO. Restul este cuprins din FeO<sub>2</sub> și Fe<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. Aceasta necesită o energie de reacție  $\Delta HC = - 4600$  kJ/kg. S-a calculat puterea degajată în urma reacției exoterme (tabelul 1.3.).

Tabel 1.3. - Valori calculate pentru puterea degajată în reacția exotermă, după [O'Neil, 2000]

Adâncimea tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii [mm]	Viteza de tăiere [mm/min]	Puterea degajată în reacția exotermă [kW]
20	1.5	700	12.5
30	2	500	18.5
40	2.5	400	23.6
50	3	300	21.52

Procedeul oxi-laser este aplicat pentru tăierea laser a materialelor groase. Acesta constă în realizarea unei pete mari a fascicului laser pe suprafața piesei, diametrul de aproximativ 4 mm, aceasta se află în centrul unei zone mai mare a jetului de oxigen de aproximativ 10 mm. Deși intensitatea la suprafața piesei scade aceasta este suficientă pentru obținerea unei temperaturi de 1000°C, necesară

activării arderii fierului. Penetrarea materialului se realizează direct prin pătrunderea frontului de oxidare în material. Odată procesul stabilizat, el nu mai este afectat de creșterea puterii. Se obțin tăieturi late la partea superioară a piesei.

În lucrarea [Lamikiz, 2005] s-a studiat aplicarea procesului de tăiere laser pentru oțeluri cu duritate ridicată. Experimentele s-au efectuat folosind un oscilator laser Rofin™ DC 025 CO<sub>2</sub>. Sistemul a avut o distanță focală de 127 mm care a permis obținerea unei pete focale cu dimensiune minimă de 0,21 mm. S-au folosit mai multe oțeluri cu rezistență crescută AHSS. Parametrii de tăiere laser au fost selectați după cum urmează: putere 200 - 600 W, gaz asistent O<sub>2</sub> cu presiune între 3 - 8 bari viteza de tăiere 2000 - 8000 mm/min, poziția punctului focal -1,5 la +1mm față de suprafața piesei. Grosimea tabelor a variat între 0,8 - 1,75 mm. S-a măsurat lărgimea tăieturii folosind o metodă optică. Zona influențată termic a fost analizată cu un microscop metalografic. Suprafața tăieturii și neregularitățile micrometrice au fost măsurate folosind un rugozimetru.

Pentru oțel cu grosimi mai mici decât 1mm ZstE260P și ZstE260+Z100, lărgimea tăieturilor a fost apropiată de ale spotului laser (0,21mm). Condițiile optime au fost stabilite pentru putere de 300W și viteză de 7000 mm/ min. Tăierea tabelor de oțel cu grosimi mai mari de 1mm: DP750 6xE45OB și ZstE 260+2C s-a făcut în alte condiții experimentale. S-a folosit presiunea oxigenului de 0,4 MPa. Poziția focarului a fost menținută deasupra suprafeței între +1,5 și 1,75mm. Se observă că cele mai ridicate valori pentru dimensiunile tăieturii se obțin pentru puteri mari și viteze de tăiere mici. Valorile dimensiunii tăieturii au fost în jur de 0,21mm. S-au obținut neregularități micrometrice de calitate bună în condițiile unei viteze de tăiere de 3000 mm/min cu o putere minimă de 300W. Se constată creșterea presiunii oxigenului care trebuie redusă pe măsură ce crește grosimea materialului. Dintre condițiile optime prezentate se remarcă că pentru table din oțel nealiat cu grosimi sub 1mm, la o putere de 200W se pot tăia table laminate cu grosimi între 0,7 - 0,8 mm la o viteză de 4000 mm/ min. Pentru a crește viteza până la 8000mm/ min este necesară o putere de 300W.

Studiul având un număr mare de tăieturi s-a realizat clasificarea acestora din punctul de vedere al realizării procesului de decupare în:

- a) tăieturi complet penetrate,
- b) tăieturi prinse (cu materialul în zona tăiată care necesită o ușoară îndoire pentru a fi desprinse);
- c) tăieturi nepenetrante.

În lucrarea [King, 1986] sunt analizate probleme legate de calitatea suprafețelor tăieturii. Se analizează frecvența variației neregularităților micrometrice și rugozitatea suprafețelor. S-a folosit un fascicul laser cu CO<sub>2</sub> Coherent Everlase 5252 care realizează o putere maximă de 450 W în regim continuu, dar care poate funcționa și în regim pulsant. Probele au avut o grosime de 1,25 mm. Presiunea oxigenului a fost menținută constantă la 30lbf in<sup>-2</sup>. S-au folosit viteze de tăiere de 30 mm/sec iradiere în undă continuă și în regim pulsant cu frecvențe între 100 și 100 Hz și durate ale pulsului între 0,5 și 5 ms.

Din experimentele anterioare și prin compararea cu neregularitățile micrometrice în regim continuu s-a calculat o frecvență naturală a neregularităților micrometrice de 250 Hz. S-a observat o îmbunătățire a calității tăieturii pe măsură ce frecvența se apropie de 500 Hz. Pentru regimul continuu apare o frecvență a neregularităților micrometrice de 248 Hz. Se pare că frecvența optimă de pulsare dublează „frecvența naturală a neregularităților micrometrice”. Pentru frecvențe de pulsare între (1000 și 800 Hz) materialul se comportă ca și în cazul în care este iradiat în regim continuu, existând numai o ușoară creștere a frecvenței

neregularităților micrometrice. În domeniul 100-400Hz s-a observat o egalitate între frecvența de pulsare și frecvența neregularităților micrometrice. S-a folosit filtrarea profilurilor pentru a determina o frecvență de bază.

În lucrarea [Arai, 2004] se prezintă experimentări asupra procesului de tăiere laser pentru oțel mediu, folosind un fascicul laser cu putere de 1 kW, presiunea oxigenului de 1-3 bari, viteze de tăiere cuprinse între 1-13 m /min și distanța dintre diuză și piesă de 1mm. Se introduce coeficientul de viteză pentru a putea alege între modelul cu viteza gazului sonică sau subsonică. S-a pus în evidență înclinarea treptată a frontului de eroziune odată cu creșterea vitezei de tăiere. Pentru grosimea de 1,2 mm viteza de tăiere de 1,2 m/ min a fost asociată cu formarea bavurilor. S-au efectuat simulări asupra înclinării frontului de eroziune.

În lucrarea [Bagger, 2001] se prezintă experimentări asupra tăierii utilizând fascicul laser cu gaz inert pentru plăci de oțel GA 260 de 1,8 mm, folosind un laser TLF cu putere maximă de 2,6 kW, în regim pulsant. A fost variată direct distanța de focalizare a lentilei. S-au folosit valorile de 5 in și 7 in pentru puterea medie. S-a analizat rugozitatea suprafețelor tăieturii. S-a observat că folosirea puterii de 2 kW va da rezultate mai bune (tăieturi drepte), comparativ cu cele obținute pentru puterile de 1,5 kW și 2,5 kW.

### **1.6.2. Aspecte ale variației parametrilor pentru tăierea laser**

Problemele legate de variația parametrilor și efectul acestora asupra funcțiilor obiectiv măsurate ocupă locul central în cercetarea experimentală a tăierii laser. Se remarcă următoarele tipuri de probleme abordate:

- *analiza variației unor funcții obiectiv cu parametrii*, cum ar fi lățimea tăieturii, rugozitatea suprafeței tăieturii, lățimea zonei afectate termic, frecvența neregularităților micrometrice care apar pe suprafața tăieturii, mărimea bavurilor care apar la partea inferioară a tăieturii. Aceste mărimi sunt de obicei rezultatul unor măsurători directe;

- *analiza variației funcțiilor obiectiv (anterior menționate) cu mărimi calculate* care caracterizează regimul de iradiere și în particular pulsul laser pentru iradierea în regim pulsant. Dintre acestea enumerăm: energia liniară, durata pulsului, puterea de vârf;

- *analiza variațiilor unor funcții obiectiv calculate* care caracterizează procesul de tăiere pe baza unor mărimi măsurate, cum ar fi debitul de material îndepărtat, energia specifică utilizată la îndepărtarea materialului;

- *analiza interdependenței unor parametrii* modificați în anumite condiții experimentale. Spre exemplu variația vitezei de tăiere cu grosimea materialului.

În prezentarea rezultatelor experimentale intervine și problema modelării matematice a variațiilor obținute. Se arată reprezentări ale punctelor experimentale, interpolare cu funcții liniare (grafice prin puncte), interpolare cu funcții spline și utilizarea unor funcții de regresie liniare. În cele ce urmează vor fi câteva tipuri de reprezentări grafice.

În lucrarea [Ghany, 2005] se prezintă experimente pentru tăierea de plăci de oțel cu grosimea de 1,2 mm folosind iradiere cu fascicul laser cu Nd:YAG în regim pulsant. Se prezintă variația lățimii medii a tăieturii cu mai multe mărimi care caracterizează regimul pulsant (figura 1.18.).

1.6 - Abordări experimentale și teoretice ale procesului de decupare cu fascicul laser 45

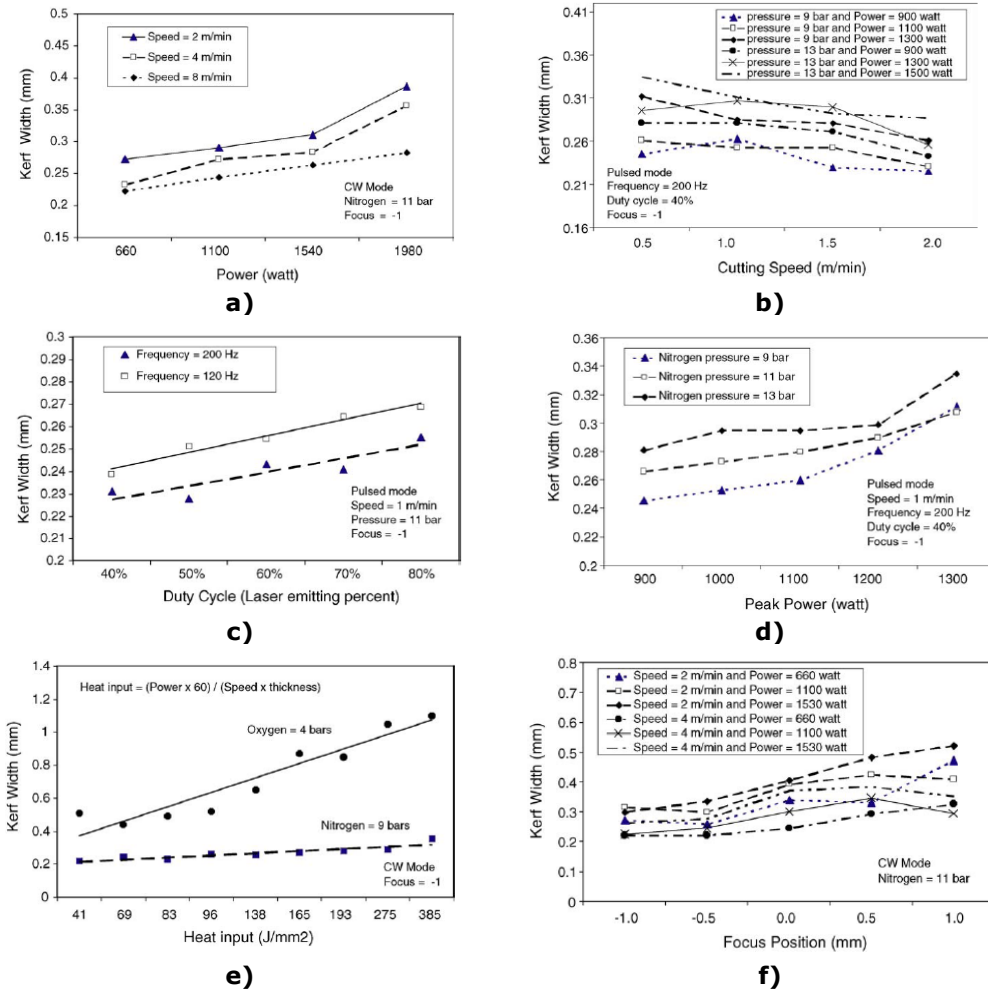


Figura 1.18. – Rezultate experimentale privind pentru variația lățimii tăieturii - a) cu puterea medie - b) cu viteza de tăiere - c) cu ciclul - d) cu puterea de vârf - e) cu fluența - f) cu poziția punctului focal în raport cu suprafața piesei (kerf width - lățimea tăieturii; power - puterea; cutting speed - viteza de tăiere; duty cycle - ciclul; peak power - puterea de vârf; heat input - fluența; focus position - defocalizarea), după [Ghany, 2005]

În lucrarea [Golnabi, 2009] se prezintă un studiu experimental privind tăierea cu fascicul laser. S-a folosit un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG cu iradiere în undă continuă, putere până la 170 W, presiuni ale oxigenului de 1-6 bari, viteze de tăiere 4-9,5 mm/s (240-570 mm/min), materialul oțel cu rezistență mecanică medie.

Relativ cu condițiile experimentale propuse de autor în teză acestea diferă prin grosimea piesei mai mică, nivelul mai scăzut al puterii, asociat cu absorbția crescută pentru fasciculul laser emis de laserul cu Nd:YAG. În figura 1.19., sunt prezentate variația lățimii medii a tăieturii cu viteza de tăiere. Se folosește

interpolarea cu funcții spline. În figura 1.20., se prezintă o corelație între parametri care au ca obiect, viteza de tăiere cu raportul dintre putere și grosimea materialului.

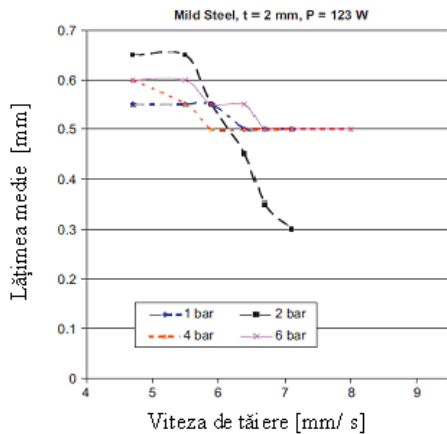


Figura 1.19. - Variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere, după [Golnabi, 2009]

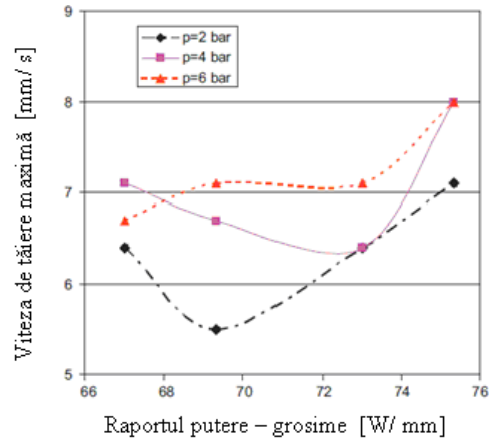


Figura 1.20. - Viteza maximă de tăiere în funcție de raportul între putere și grosimea materialului după [Golnabi, 2009]

În lucrarea [Kaebernick, 1999] se studiază tăierea laser asistată de oxigen pentru plăci de oțel de 0,9 mm grosime (oțel fără compoziție chimică controlată). În figura 1.21. a) și b), se prezintă variația lățimii tăieturii la partea superioară, respectiv la partea inferioară, cu durata pulsului. Se utilizează interpolarea folosind funcții de regresie liniare.

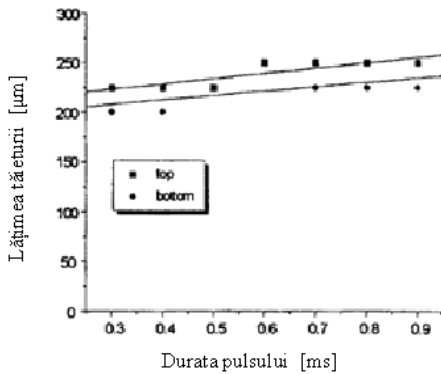


Figura 1.21.a) - Variația lățimii tăieturii cu durata pulsului, după [Kaebernick, 1999]

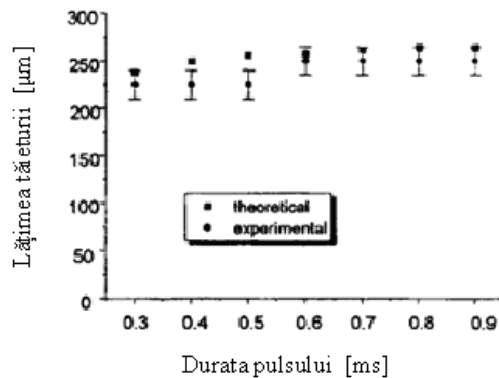


Figura 1.21.b) - Variația lățimii medii a tăieturii cu durata pulsului, puncte experimentale și calcule teoretice, după [Kaebernick, 1999]

Se observă că între mărimile variate o importanță deosebită o au acelea care apar independent de mărimile care caracterizează regimul pulsat. Acestea sunt viteza de tăiere și energia liniară.

1.6 - Abordări experimentale și teoretice ale procesului de decupare cu fascicul laser 47

Legat de variația parametrilor apare și problema optimizării procesului de tăiere laser. Acesta se poate realiza pentru serii experimentale de tip clasic prin analiza minimelor și maximelor obținute pe funcții de regresie. O altă metodă constă în analiza directă a rezultatelor. Astfel are loc o clasificare calitativă a tăieturilor și identificare unor regiuni experimentale favorabile pe domeniul experimental dat de variația a doi parametri. În cele ce urmează sunt prezentate astfel de reprezentări (figura 1.22., figura 1.23.).

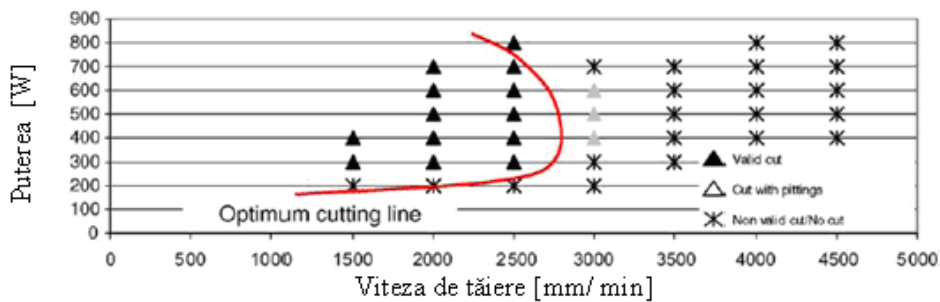


Figura 1.22. – Identificarea domeniului optim pentru realizarea procesului de tăiere laser (optimum cutting line - linia de separație pentru zona cu valorile optime ale parametrilor; valid cut - tăietură bună; cut with pitings - tăietură afectată calitativ; not valid cut or no cut - tăietură necorespunzătoare sau nepenetrată), după [Lamikiz, 2005]

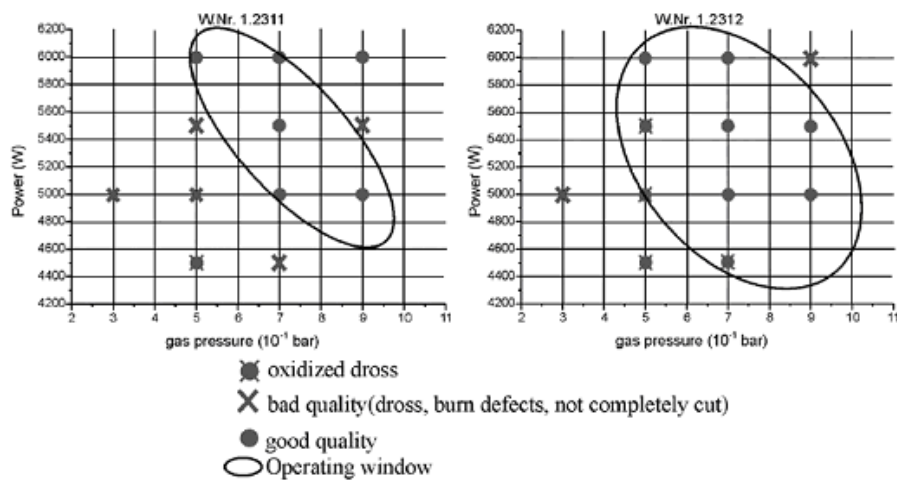


Figura 1.23. – Identificarea domeniului optim pentru realizarea procesului de tăiere laser (power - puterea; gas pressure - presiunea oxigenului; oxidized dross - bavuri din oxizi; bad quality (dross, burn defects, not completely cut) - calitate slabă a tăieturii (bavuri, arsuri, tăieturi nepenetrante); good quality - calitate bună a tăieturii; operating window - zona optimă de reglare a parametrilor), după [Nagels, 2007]

În cele prezentate anterior s-au arătat principalele probleme abordate în cercetarea experimentală pe baza unor serii experimentale clasice obținute pe baza variației unor parametrii.



Asupra studiilor de acest tip analizate, se pot face următoarele observații:

- majoritatea autorilor preferă utilizarea unor domenii experimentale înguste în jurul unor valori care asigură realizarea tăierii. Nu se realizează variații pe întreg domeniul experimental dat de posibilitățile sistemului tehnologic. Aceasta face ca valorile pentru mărimile măsurate obținute să fie foarte apropiate. Astfel variațiile obținute rămân particulare, nu pot fi asociate corect cu parametrii modificați sau cu alte cercetări experimentale;

- există o relativă reducere a utilizării funcțiilor de regresie. Se preferă funcții de regresie liniare, variațiile respective nu sunt liniare, lucru care ar fi observat dacă domeniul experimental ar fi mai mare. Se ignoră studiul statistic, mai precis, calculul coeficienților de corelație pentru funcțiile de regresie prezentate;

- cu cât se introduc mai multe asocieri între mărimi, fie între parametrii variații, fie prin introducerea unor funcții obiectiv care în expresia lor conțin constante de material sau aproximarea unor valori, duce la reducerea posibilității ca aceste modificări să fie interpretabile din punct de vedere fenomenologic.

Abordarea cercetării experimentale propuse în prezenta teză de doctorat va avea în vedere eliminarea acestor deficiențe observate la alte cercetări științifice și studii.

### **1.6.3. Modelarea experimentală în procesele de tăiere cu fascicul laser**

Modelarea experimentală constă în a stabili relații matematice (funcții de corelație) între parametrii modificați și valorile funcțiilor obiectiv măsurate sau calculate. Obținerea acestor relații este însoțită de analiza statistică a variațiilor obținute. În cele ce urmează se vor analiza câteva studii care prezintă modele experimentale pentru tăierea laser.

În lucrarea [Caydas, 2008] se prezintă un studiu privind optimizarea procesului de tăiere laser asistată de oxigen oțel St-37 (același tip de oțel pe care s-au realizat experimentările prezentate în această teză, respectiv S 235 – SR EN 10025/ OL 37). S-a întrebuintat un sistem tehnologic laser CO<sub>2</sub>, cu putere maximă 2000 W cu funcționare în regim pulsant. Distanța dintre diuză și piesa de prelucrat a fost de 1mm. Distanța focală a lentilei a fost de 127 mm. Grosimea plăcii tăiate a fost de 10 mm. În experimente s-au variat puterea și viteza de tăiere. Pentru fiecare din cei patru parametri s-au considerat patru nivele. S-a utilizat metoda de analiză Grey pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor. Ca funcții obiectiv au fost analizate rugozitatea suprafeței tăieturii, lățimea tăieturii la partea superioară a piesei și adâncimea zonei afectate termic.

În lucrarea [Almeida, 2006] se prezintă probleme de optimizare pentru tăierea laser a plăcilor din aliaj de titan. S-a folosit un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG. Parametrii variați au fost frecvența de pulsare, energia pe puls și diametrul găurii realizate în material la iradierea statică. Ca funcții obiectiv au fost analizate rugozitatea suprafeței tăieturilor și mărimea neregularităților micrometrice. S-a folosit metoda de analiză a variațiilor ANOVA pentru analiza efectului acoperii spoturilor succesive (spot-overlap), exprimat în procente, și energiei pe puls. S-a folosit metoda experimentelor factoriale. S-a analizat variația durității materialului prin metoda Vickers.

În lucrarea [Dubey, 2007] se prezintă un studiu privind optimizarea tăierii cu fascicul laser a unor aliaje pe bază de nichel. (SUPERNI 718). Acest aliaj conține 18,5 % fier, ceea ce justifică folosirea oxigenului ca și gaz asistent. Tăierea s-a realizat folosind un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG. Grosimea plăcii a fost de 0,7



mm. Distanța focală a lentilei a fost de 50 mm. Diametrul diuzei a fost de 1 mm și distanța dintre diuză și piesă 1mm. Se folosește metoda Taguchi și optimizarea pentru mai multe funcții obiectiv. Parametrii modificați au fost presiunea oxigenului, durata pulsului, frecvența de pulsare și viteza de tăiere. Ca funcții obiectiv s-au considerat lățimea tăieturii la partea superioară a piesei, diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei, și unghiul de înclinare a peretelui tăieturii. Studiul statistic a constatat în aplicarea metodei de analiză a variațiilor ANOVA. S-a considerat efectul parametrilor fără a se considera efectele interacțiunilor între parametri. S-a pus în evidență contribuția importantă a vitezei de tăiere la modificarea valorilor funcțiilor obiectiv, figura 1.24. Studii privind optimizarea procesului de tăiere laser pentru același material, aliaj de nichel, au fost prezentate în lucrările [Rao 2009] și [Sharma, 2010].

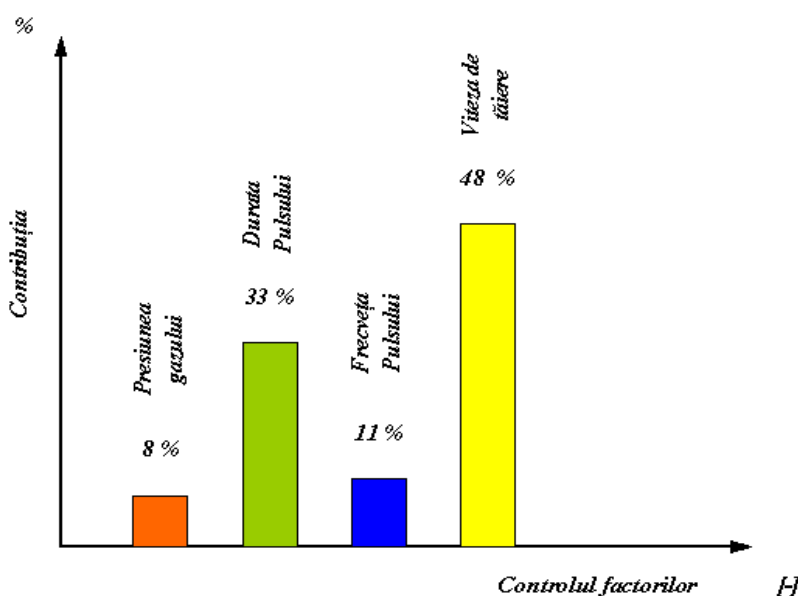


Figura 1.24. – Controlul și contribuția factorilor de influență, după [Dubey, 2007]

În lucrarea [Dubey, 2008] se prezintă tăierea cu fascicul laser a unei plăci de siliciu. Ca funcție obiectiv se consideră debitul de material prelucrat. Se folosește metoda suprafețelor de răspuns și metoda Taguchi pentru aflarea condițiilor de optim. Ca parametri modificați s-au considerat presiunea gazului, durata pulsului și viteza de tăiere. Pentru fiecare parametru au fost considerate patru nivele. Pentru lățimea tăieturii la suprafață și pentru debitul de prelucrare se prezintă modele matematice pătratice ce conțin parametrii, pătratul parametrilor și interacțiunile de ordinul doi între parametri. Se dau prescripții pentru valorile optime ale parametrilor.

În lucrarea [Rajam, 2003] se prezintă o cercetare experimentală asupra unei plăci de oțel 4130 folosind un sistem tehnologic laser cu CO<sub>2</sub>. Iradierea s-a realizat folosind un regim pulsant cu valori ale puterii medii 700 - 1300 W. Pentru viteza de tăiere s-au considerat valori 29,6 - 55 mm/s (1776 - 3300 mm/min), valoarea pentru ciclu 85% și presiunea oxigenului de 1,3 kgf/cm<sup>2</sup> (1,27 bar sau

0,12 MPa). Distanța între diuză și piesă a fost de 1,5 mm. Grosimea plăcii a fost de 1,27 mm. Se observă că, condițiile experimentale sunt apropiate de cele utilizate pentru experimentările prezentate în această teză. S-au modificat puterea, viteza de tăiere și ciclul. Variațiile pentru nivelele considerate în planurile experimentale s-au încadrat în limita de 25% crescător, respectiv descrescător, față de valorile prescrise de producătorul sistemului tehnologic. S-au analizat următoarele funcții obiectiv: lățimea tăieturii, mărimea zonei afectate termic, frecvența neregularităților micrometrice pe suprafața tăieturii. S-a măsurat rugozitatea suprafeței tăieturii. Experimentele au fost realizate după planuri experimentale factoriale. Se prezintă modele matematice pătratice. Analiza variațiilor a fost realizată prin metoda ANOVA.

În concluziile lucrării se prezintă următoarele aprecieri asupra efectelor parametrilor:

- puterea are un efect major asupra lățimii tăieturii în timp ce rolul vitezei de tăiere este redus. Scăderea puterii și creșterea vitezei de tăiere scad lățimea tăieturii și a zonei afectate termic. Pentru puteri reduse, creșterea vitezei de tăiere va duce la o puternică scădere a lățimii tăieturii și o ușoară creștere a zonei afectate termic;

- viteza de tăiere are un efect puternic asupra rugozității suprafețelor tăieturii și a frecvenței neregularităților micrometrice pe suprafața tăieturii. Pentru fiecare combinație a parametrilor s-a identificat o valoare a vitezei de tăiere pentru care rugozitatea suprafeței este minimă. Puterea are un efect mic asupra rugozității suprafețelor și nici un efect asupra frecvenței neregularităților micrometrice.

### 1.7. Aspecte tehnico-economice ale procesului de tăiere laser

Asupra aspectelor economice care apar la utilizarea sistemelor tehnologice laser, se remarcă următoarele [Chryssolouris, 1990]:

- prelucrările cu fascicul laser nu necesită contactul între sculă și piesă. Se elimină uzura sculei și costurile legate de înlocuirea acestora;

- se elimină timpii pierduți datorită opririi mașinii/ sistemului tehnologic pentru schimbarea și recalibrarea sculei;

- oscilatorul laser se integrează într-un sistem tehnologic. Există flexibilitate între diferitele părți ale sistemului tehnologic. Folosirea unui sistem cinematic cu comandă numerică care ajută la maximizarea vitezelor de prelucrare;

- fasciculul laser permite prelucrări de precizie și prin aceasta economii de material;

- în comparație cu alte tehnologii neconvenționale de prelucrare, prelucrarea cu fascicul laser nu necesită operare în vid sau într-un alt mediu special.

Pentru sistemele tehnologice laser se remarcă mai multe tipuri de costuri implicate. Acestea vor fi analizate, după cum urmează:

a) **Oscilatorul laser.** Pentru achiziționarea unui oscilator laser de mare putere sunt necesare investiții masive. În general costurile depășesc câteva sute de mii de dolari. Costul achiziționării se raportează la puterea emisă, fiind proporțional cu aceasta. Mărimea costului sistemului este de 110 \$/ watt putere nominală. Achiziționarea unui sistem „modern” (relativ) dublează costul 220 \$/ watt. Achiziționarea unui sistem complet, cu masă mobilă, ajunge la 500 \$/ watt. Echipamentul are o viabilitate de 20 000 ore de funcționare, 10 ani funcționare la 2000 ore/ an. Aceasta conduce la un cost de amortizare de 25 \$/ oră.

b) **Costurile echipamentelor asociate.** Oscilatorul laser este integrat într-un sistem tehnologic. O parte din echipamente se adaptează condițiilor concrete de utilizare. Apar costuri pentru sistemul de răcire, sistemul de alimentare cu energie electrică, sistemul de transmitere a radiației către piesă, sistemul de poziționare a piesei (masă în coordonate, sau un robot cu mai multe axe). Costul acestor echipamente depășește pe cel al oscilatorului laser.

c) **Costurile de operare.** Costurile de operare includ pentru oscilatoarele laser cu CO<sub>2</sub> gazele necesar mediului activ He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, energia electrică, consumul de gaz asistent și de apă pentru răcirea mediului activ. Se prezintă următoarele date:

*Costul consumabilelor:* Energia electrică pentru puterea laserului și sistemul de răcire cu apă este de 73 kW când puterea laserului este de 3 kW. Costul gazelor folosite în procesele de prelucrare laser:

He: 32 (l/ oră) x \$ 0,021 = \$ 0,68/ oră;

CO<sub>2</sub>: 1,5 (l/ oră) x \$ 0,12 = \$ 0,18/ oră;

N<sub>2</sub>: 6,5 (l/ oră) x \$ 0,007 = \$ 0,046/ oră.

- aceste gaze se folosesc pentru mediul laser. Gazele se recirculă pentru a menține proprietățile mediului laser.

*Gazul asistent în procesul de tăiere:*

O<sub>2</sub>: \$ 0,0065 x 1000 (l/ oră) = \$ 6,50/ oră;

N<sub>2</sub>: \$ 0,0015 x 3000 (l/ oră) = \$ 4,68/ oră.

*Serviciul și mentenanța sistemului laser:*

\$ 6000/ an.

d) **Costurile de pregătire a operatorilor și de întreținere a sistemului.**

Utilizarea sistemelor de tehnologice laser necesită operatori cu înaltă calificare pentru exploatarea și întreținerea aparaturii. Deoarece sistemul tehnologic laser este folosit continuu este necesară angajarea de operatori cu pregătire profesională, psihică și fizică ridicată.

e) **Costuri ale echipamentelor de protecție.** Instalarea unor echipamente de protecție este obligatorie în cazul utilizării sistemelor tehnologice laser. Dintre acestea se enumeră: echipamente necesare evacuării de fum și gaze, protecții pentru radiația laser care se transmite liber, lămpi de avertizare, sonerii, încuietori automate ale ușilor. Sunt necesare renovări periodice în spațiul destinat funcționării sistemului tehnologic laser. Este necesar ca spațiul respectiv să fie protejat de vibrații.

Amortizarea sistemelor tehnologice laser se realizează prin operarea continuă și încărcarea la maxim a utilajului. Se va avea în vedere o categorie largă de prelucrări posibile. Atât sistemele laser cu CO<sub>2</sub> cât și cele cu Nd:YAG permit prelucrarea atât a materialelor metalice cât și a celor nemetalice. Se vor avea în vedere prelucrări de materiale pentru care folosirea fasciculului laser să reprezinte singura soluție, cum ar fi spre exemplu, pentru materiale dure sau fragile.

Pentru procesele de prelucrare laser și în particular pentru decuparea laser, se enumeră următoarele **avantaje**:

- prelucrarea cu fascicul laser este unul dintre cele mai rapide procese de prelucrare a materialelor. Există o mare flexibilitate în ceea ce privește tipuri, forme și poziții de prelucrare;

- tăierea laser este un proces de tăiere non-contact și prin urmare nu există uzura sculei și deformarea materialului prelucrat;

- tăierea laser este aplicabilă aproape pentru toate materialele cunoscute și procesul poate fi ușor automatizat, permițând un control adaptiv.

Pentru procesele de prelucrare laser și în particular pentru decuparea laser, se enumeră următoarele **dezavantaje**:

- consum energetic ridicat;
- dezavantajele unei procesări termice a materialelor;
- producerea de vapori metalici dăunători pentru personalul operator.

În cadrul proceselor de prelucrare a materialelor metalice cu fascicul laser, tăierea ocupă primul loc ca utilizare (figura 1.25.).

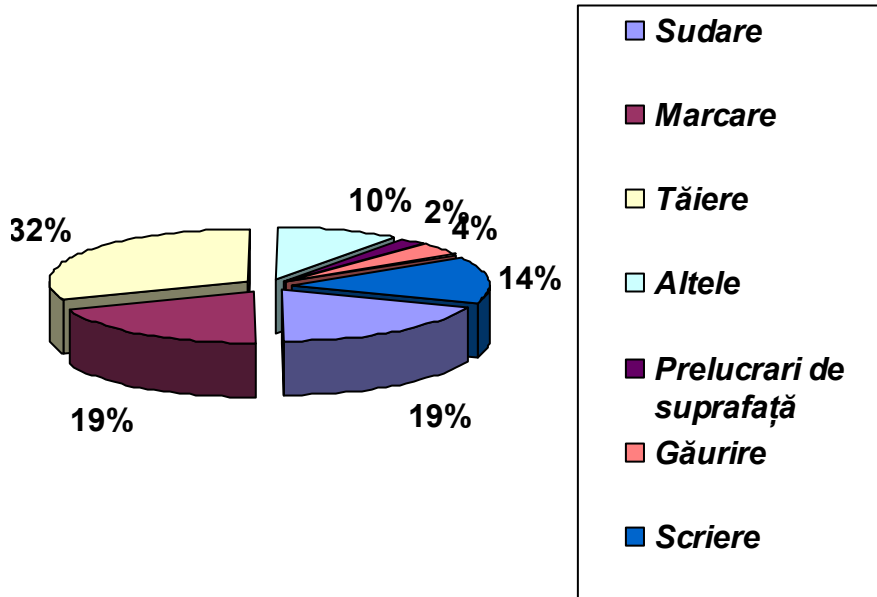


Figura 1.25. – Ponderea utilizării fasciculului laser industrial în procesele de prelucrare, la nivelul anului 2005, după [Ion, 2005]

Aplicațiile tăierii laser pentru materiale ceramice se justifică prin caracterul fragil al acestora și dificultatea prelucrării acestora prin mijloace mecanice. Pentru materialele metalice, a tablelor subțiri, tăierea laser este utilizată datorită productivității ridicate și afectării materialului mai mică decât deformările realizate la tăierea mecanică. Pentru tăierea tablelor groase, tăierea laser apare ca o soluție tehnologică particulară, uneori singura soluție tehnologică. Pentru tăierea laser locul principal îl ocupă tăierea laser asistată de oxigen. În condițiile unui bun control al procesului se realizează tăieturi de precizie fără afectare termică semnificativă a materialului. Compararea între tăierea laser și tăierea cu jet de apă a fost realizată în lucrarea [Zheng, 1996]

În lucrarea [Anderson, 2006] este prezentată o comparație între costurile care apar în procesele de tăiere (figura 1.26.). Se observă că acestea sunt mai mici decât cele care intervin la tăierea prin procedee mecanice și cele care apar în procedeul de tăiere cu oxi-acetilenă.

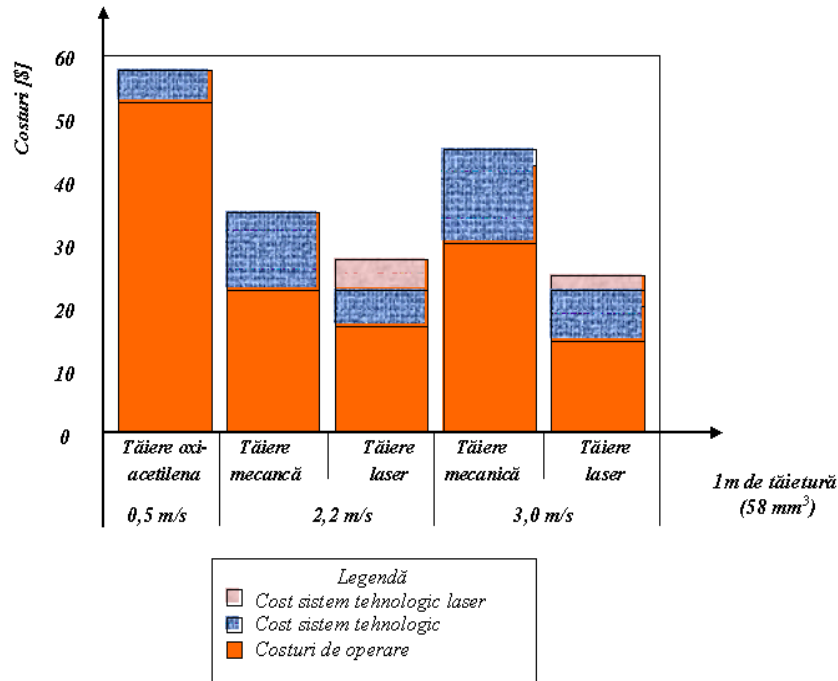


Figura 1.26. – Costuri comparative pentru 1 m de tăietură, după [Anderson, 2006]

## 1.8. Obiectivele cercetării doctorale

Deși parametrii funcționali și factorii de influență sunt bine definiți și pot fi cunoscuți fiecare în parte, există probleme legate de modul lor de interacțiune. Pentru aceasta s-a propus o cercetare științifică experimentală în care se folosește un program experimental complex, pentru a permite evaluarea efectelor interacțiunilor care au loc între parametrii modificați la decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel nealiat. Aceasta va fi însoțită de abordări teoretice și modelare analitică. S-au enunțat următoarele obiective principale ale programului de cercetare doctorală:

- O.1. – Sinteza informațiilor și cunoștințelor în evoluția aplicării industriale a procedurii laser la decuparea materialelor metalice.
- O.2. – Elaborarea și aplicarea modelului cibernetic de tipul intrare-ieșire, la controlul și optimizarea procesului de tăiere cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub> a tablelor din oțel nealiat.
- O.3. – Modelarea analitică și experimentală a caracteristicilor tăieturilor realizate cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub>.
- O.4. – Controlul și caracterizarea energetică a procesului de tăiere cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub> a oțelurilor.
- O.5. – Optimizarea tehnologică a calității suprafețelor tăieturilor realizate prin procesul de tăiere cu fascicul laser cu CO<sub>2</sub> a tablelor din oțel nealiat.

Pentru cercetarea experimentală propusă se formulează următoarele obiective specifice:

1. Evaluarea efectului principalilor parametri modificați în procesul de tăiere laser asistat de oxigen asupra tăieturii folosind un sistem laser cu CO<sub>2</sub> pentru table de oțel S235 – SR EN 10025 (OL 37 STAS 500/2), material folosit în multe aplicații industriale.

2. Evaluarea modificării fiecărui parametru în parte, pe un domeniu experimental larg, dat de posibilitățile sistemului tehnic, în timp ce pentru ceilalți parametri se consideră valori care asigură realizarea tăierii.

3. Evidențierea efectelor presiunii oxigenului și vitezei de tăiere asupra condiții experimentale variate.

4. Modelarea matematică pentru evidențierea variației unor funcții obiectiv legate de lățimea tăieturii pentru planurile experimentale clasice și pentru planurile experimentale factoriale.

5. Utilizarea în condiții experimentale practice a pachetelor de parametri de lucru, care să pună în evidență atât aspecte tehnologice cât și aspecte fenomenologice ale procesului de tăiere laser asistat de oxigen.

### 1.9. Concluzii

În Capitolul 1 au fost prezentate principalele aspecte ale procesului de tăiere laser asistată de oxigen. S-au prezentat următoarele probleme:

- apariția și utilizarea oscilatoarelor laser;
- proprietățile fizice ale fascicolului laser care intervin în procesele de prelucrare;
- aspecte ale construcției oscilatoarelor laser cu CO<sub>2</sub> ;
- integrarea oscilatoarelor laser într-un sistem tehnologic și iradierea piesei cu fascicol laser;
- desfășurarea și analiza din punct de vedere a fenomenelor fizice a procesului de tăiere laser asistată de oxigen, apariția frontului de topire și a frontului de eroziune;
- rolul jetului de gaz asistent (oxigenul) pentru îndepărtarea materialului topit;
- condițiile de iradiere care sunt necesare pentru a obține topirea și formarea tăieturii;
- efectul oxigenului ca și gaz reactiv în procesul de tăiere laser a tablelor din oțel, condiții de realizare a reacției de ardere a fierului în oxigen;
- probleme tehnologice care apar la tăierea laser asistată de oxigen puse în evidență prin studii experimentale;
- rezultate ale cercetării și modelării experimentale a procesului de tăiere laser prezentate în diferite studii experimentale;
- modalități de punere în evidență a unor condiții optime sau favorabile procesului de tăiere laser;
- încadrarea tăierii laser din punct de vedere tehnico-economic între alte procese de tăiere similare.

În urma sintezei bibliografice realizate s-au formulat obiectivele tezei de doctorat. Acestea au prezentat următoarele componente:

- organizarea unei cercetări experimentale pornind de la un model de tip intrări-ieșiri;
- caracterizarea și optimizarea procesului de tăiere laser în raport cu mărimi care caracterizează calitatea tăieturii.

Sinteza prezentată are la bază alte sinteze prezentate de autor [Glod, 2005], [Glod, 2006 a,b,c], [Glod, 2007 a,b].

Principalele idei legate de fenomenologia procesului de tăiere laser asistată de oxigen pot fi sistematizate după cum urmează:

- Intensități ale fascicolului laser de aproximativ  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> și timpi de interacțiune între radiația laser și material asigură realizarea procesului de tăiere.
- Prima etapă a realizării tăierii este obținerea găuririi materialului. Aceasta se realizează prin efectul cumulat al vaporizării topirii și presiunii exercitate de gazul asistent.
- A doua etapă a realizării tăierii o constituie obținerea frontului de tăiere (sau de eroziune). Acesta se propagă în material în direcția de tăiere și se asigură îndepărtarea materialului în stare topită.
- A treia etapă a realizării procesului de tăiere constă în obținerea unui echilibru energetic care să asigure stabilitatea tăieturii.

Pentru realizarea tăieturii se consideră că aceasta are ca mecanism de realizare topirea materialului, supraîncălzirea materialului topit și apoi evacuarea forțată a materialului topit. La frontul de tăiere are loc reacția chimică de ardere a fierului în oxigen, reacție care aduce un aport energetic la frontul de tăiere. Reacția de oxidare are loc la temperaturi apropiate de temperatura de topire a materialului. Reacția chimică este o reacție exotermă iar căldura degajată este utilizată pentru topirea materialului.

Asupra procesului de tăiere cu fascicol laser se prezintă următoarele clasificări importante.

- a) din punctul de vedere al grosimii materialului tăiat:
  - tăierea laser a tablelor subțiri (până la 6 mm);
  - tăierea laser a tablelor groase.
- b) din punctul de vedere al organizării procesului de tăiere:
  - tăierea laser asistată de un gaz neutru (heliu, azot);
  - tăierea laser asistată de un gaz reactiv, folosirea oxigenului la tăierea plăcilor din oțel.
- c) după stare de agregare a materialului
  - tăierea laser de evaporare și /sau descompunere chimică a materialului;
  - tăierea laser cu îndepărtarea materialului în stare topită.

S-a arătat că în tăierea laser pot fi utilizate atât sisteme tehnologice laser cu Nd:YAG cât și sisteme tehnologice laser cu CO<sub>2</sub>. Ca elemente importante ale procesului de tăiere se remarcă:

- condițiile de focalizare a fascicolului laser la suprafața piesei;
- adaptarea valorilor puterii și vitezei de tăiere cu grosimea materialului.

Mai multe studii experimentale au fost analizate în Capitolul 1. Selecția acestora a avut ca scop prezentarea unor aspecte esențiale ale procesului de tăiere. S-au analizat lucrări în care se prezintă condiții experimentale apropiate de cele care au fost utilizate în experimentările prezentate în teza de doctorat. Un alt aspect urmărit a fost de a prezenta planuri experimentale similare cu cele prezentate în lucrare și diferite modalități de prezentare a rezultatelor experimentale.

S-a arătat că principalele direcții de studiu abordate de alți cercetători sunt:

- realizarea procesului de tăiere;
- calitatea suprafețelor tăieturii prin forma secțiunii transversale prin tăietură, rugozitatea suprafețelor tăieturii –asociată cu tipul și frecvența neregularităților micrometrice;
- modificarea structurii și durtății materialului în zona tăieturii.

S-a arătat că lăţimea tăieturii şi forma secţiunii prin tăietură sunt legate atât de realizarea procesului de tăiere cât şi de obţinerea unor tăieturi de calitate. Dintre parametrii variaţi în experimente s-a remarcat viteza de tăiere. Majoritatea optimizărilor în tăierea laser se realizează asupra vitezei de tăiere. În jurul problematicii experimentale analizate în Capitolul 1 s-a construit cercetarea experimentală prezentată în capitolele următoare.

Studiile analizate au arătat că tăierea laser asistată de oxigen reprezintă un domeniu larg cu multe probleme care rămân nesoluţionate. Astfel se pot formula ca probleme deschise în tăierea laser de oxigen:

- Controlul şi realizarea procesului de tăiere în situaţii în care elemente noi cum ar fi spre exemplu prelucrarea unui material nou pe un sistem tehnologic dat.

- Studiul fenomenelor fizice care apar în procesul de tăiere laser asistată de oxigen. Acest lucru este valabil atât pentru fizice legate de încălzire cât şi pentru cele legate de propagarea jetului de gaz la frontul de tăiere.

- O problemă separată este realizarea şi aplicarea procesului de tăiere laser în condiţii industriale.

Aceste tipuri de probleme vor fi abordate în capitolele următoare.



## **2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU TĂIEREA CU FASCICUL LASER**

### **2.1. Obiective ale cercetării experimentale proprii**

Sistemele tehnologice laser cu CO<sub>2</sub> au pătruns cu succes în industrie. Asemenea sisteme tehnologice sunt livrate împreună cu o bază de date în care sunt detaliate valorile parametrilor pentru diferite materiale. La dispoziția utilizatorilor nu se pun rezultate experimentale care să arate efectul parametrilor asupra unor caracteristici ale tăieturii care să facă posibilă adaptarea parametrilor pentru situații de prelucrare care diferă, mai mult sau mai puțin, de cele prescrise de producătorul sistemului tehnologic. Utilizatorul obișnuit nu are la dispoziție specificații tehnice detaliate, accesibile, care să permită ajustări între parametrii, pentru realizarea procesului de tăiere sau desfășurarea acestuia în condiții optime. Compensarea acestor lipsuri se realizează prin experimentări proprii. În cele ce urmează se vor prezenta astfel de experimentări care studiază efectul modificării fiecărui parametru în parte pornind de la o combinație optimizată recomandată a parametrilor pentru tăiere. Deosebirea față de alte cercetări experimentale similare este aceea că se va considera, pentru fiecare parametru în parte, un domeniu de variație larg.

Obiectul cercetării experimentale a fost tăierea laser asistată de oxigen a tablelor subțiri din oțel nealiat. S-a utilizat un sistem tehnologic laser cu CO<sub>2</sub> care permite realizarea de diferite prelucrări între care și decuparea/ tăierea. Materialul ales pentru experimentări a fost S235 – SR EN 10025 (OL 37 STAS 500/2), material care este ieftin și utilizat pe larg în industrie. Probleme specifice legate de comportarea termică a oțelurilor sunt prezentate în lucrările [Ispas, 1998], [Nanu, 2003]. Parametrii care intervin în experimente pot fi clasificați în parametrii care caracterizează condițiile de iradiere și parametrii care caracterizează în general procesul de tăiere. Parametrii care controlează iradierea se împart în două categorii și anume: parametrii care controlează intensitatea fascicolului laser și parametrii care controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material.

Organizarea experimentelor a permis să se facă distincție clară între aceste două categorii de parametrii. Mai mulți parametrii pot fi legați de desfășurarea procesului de tăiere. Dintre aceștia au fost selectați presiunea oxigenului și distanța dintre diuză și piesă. Modificarea a doi parametrii a fost analizată pe larg în programul experimental propriu: presiunea oxigenului și viteza de tăiere. Efectul lor a fost studiat pentru diferite valori ale celorlalți parametrii, pentru mai multe serii experimentale clasice.

Organizarea experimentelor a urmărit folosirea seriilor experimentale clasice în care un singur parametru se modifică cât și a planurilor experimentale factoriale, în care mai mulți parametrii se modifică simultan. Se prezintă un plan experimental factorial complet de tip 2<sup>5</sup>. Seriile experimentale au fost asociate, pe de o parte cu parametrii care caracterizează procesul de tăiere, iar pe de altă parte cu condițiile de iradiere. S-a urmărit astfel, obținerea de două nivele distincte pentru timpul pulsului. Prin aceasta se disting serii experimentale pentru care s-au utilizat durate ale pulsului mici și durate ale pulsului lungi.

Scopul cercetării experimentale prezentate se formulează astfel: **Controlul și optimizarea procesului de tăiere laser asistat de oxigen pentru table din oțel.**

Pentru cercetarea experimentală propusă se formulează următoarele obiective specifice:

1. Evaluarea efectului principalilor parametri modificați în procesul de tăiere laser asistat de oxigen asupra tăieturii folosind un sistem laser cu CO<sub>2</sub> pentru table de oțel SR EN 10025 (OL 37 STAS 500/2 S235), material folosit în multe aplicații industriale.

2. Evaluarea modificării fiecărui parametru în parte, pe un domeniu experimental larg, dat de posibilitățile sistemului tehnic, în timp ce pentru ceilalți parametri se consideră valori care asigură realizarea tăierii.

3. Evidențierea efectelor presiunii oxigenului și vitezei de tăiere asupra condițiilor experimentale variate.

4. Modelarea matematică pentru evidențierea variației unor funcții obiectiv legate de lățimea tăieturii pentru planurile experimentale clasice și pentru planurile experimentale factoriale.

5. Utilizarea în condiții experimentale practice a pachetelor de parametri de lucru, care să pună în evidență atât aspecte tehnologice cât și aspecte fenomenologice ale procesului de tăiere laser asistat de oxigen.

## **2.2. Condiții experimentale generale**

Condițiile experimentale generale se referă la prescrierea valorilor parametrilor tehnologici pe care le permite sistemul tehnic și care au fost menținute neschimbate în timpul procesului de prelucrare. Formularea acestora se face la modul general. Condițiile experimentale generale sunt alese astfel încât să facă posibilă realizarea procesului de tăiere laser. Principalele elemente care intră în analiză sunt cele legate de materialul de prelucrat și de sistemul tehnologic.

### **2.2.1. Sistemul tehnologic laser utilizat pentru programul experimental**

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat sistemul tehnologic laser cu CO<sub>2</sub> Mazak 1500W (figurile 2.1., 2.2., 2.3. și 2.4.).



Figura 2.1. – Sistemul tehnologic Mazak 1500 W, vedere generală

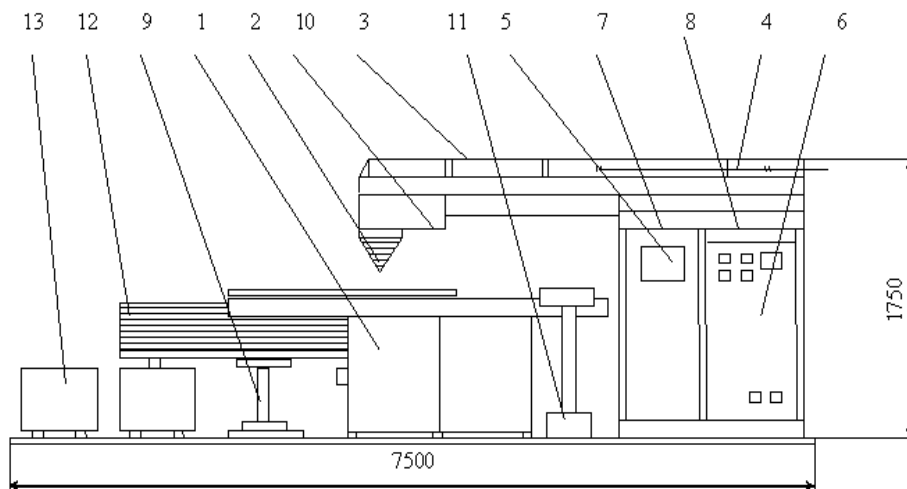


Figura 2.2. – Sistemul tehnologic Mazak 1500 W

Sistemul tehnologic Mazak 1500 W permite prelucrări bidimensionale, prin mișcarea capului laser în coordonate X, Y. Se utilizează mișcarea capului laser deasupra piesei și transmiterea radiației către capul laser folosind optică mobilă. Funcționarea sistemului tehnologic poate avea loc atât în regimul continuu cât și în regimul pulsant. Se pot realiza prelucrări laser atât pentru materiale metalice cât și

pentru materiale nemetalice. Prelucrarea are loc în spațiu deschis, cu protejarea operatorului.

Blocurile componente ale sistemului MAZAK 1500 W sunt:

1. Sistemul de deplasare piesă în coordonate x – y;
2. Capul de tăiere cu sistem de urmărire a denivelărilor tablei (traductor capacitiv);
3. Cap laser CO<sub>2</sub> 1500 (generare fascicul laser);
4. Obturator laser;
5. Radiometru (pentru măsurarea puterii laser);
6. Sursa de alimentare laser;
7. Echipament CNC;
8. Instalația electrică pentru acționare;
9. Instalația hidraulică pentru ridicare;
10. Lampă de iluminare zonă de lucru;
11. Pupitru de comandă;
12. Depozitare materiale de procesat;
13. Containere reperi.



Figura 2.3. – Sistemul tehnologic Mazak 1500 W, pupitru de comandă



Figura 2.4. – Sistemul tehnologic 1500 W, capul de lucru

Principalele caracteristici tehnice ale sistemului tehnologic MAZAK 1500 W sunt:

*Cap laser*

- mediu activ: amestec de gaze CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>;
- lungimea de undă a radiației laser  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ;
- puterea fasciculului laser, reglabilă: 300 ... 1500W;
- diametrul fasciculului laser: 25 mm.

*Cap de lucru:*

- cursa maximă pe axa z: 99,45 mm;
- distanța focală a lentilei de concentrare a fasciculului laser: 75 mm;
- diametrul fasciculului laser concentrat. 0,2 mm;
- sistem de menținere constantă a distanței de focalizare prin traductor capacitiv;
- presiunea gazelor auxiliare:  $0,5 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ .

*Sistem de deplasare piesă în coordonate x-y:*

- curse maxime pe axele x – y: 1275 X 2550 mm;
- viteze tehnologice de deplasare manuală și prin CNC: 0,1 ... 10 m/ min;
- precizie de conturare:  $\pm 0,1 \text{ mm/ m}$ .

*Echipament CNC: Bosch*

*Instalație electrică de comandă și control:*

- tensiune de alimentare: 3 x 380V/ 50 Hz;
- putere medie totală consumată: 22 kVA;
- puterea medie consumată de dispozitivul laser: 22 kVA.

*Mod de acționare:*

- prin CNC;
- manual, de la pupitrul de comandă al sistemului tehnologic.

Aplicarea tăierii laser asistate de oxigen pentru table subțiri pe acest sistem tehnologic permite realizarea de came și alte piese de serie cu sau fără decupări interioare. Suprafețele acestora nu necesită prelucrări ulterioare.

### 2.2.2. Materialul procesat

În cadrul experimentelor s-a utilizat tablă laminată la rece S 235 – SR EN 10025 (OL 37 – STAS 500/2), cu grosimea de 3 mm. Compoziția chimică, respectiv caracteristicile mecanice furnizate de producător, sunt prezentate în tabelele 2.1. și 2.2. Tăieturile efectuate au avut lungimea de 100 mm.

Tabel 2.1. – Compoziția chimică dată de producător pentru S 235 – SR EN 10025.  $g=3$  mm

S 235 – SR EN 10025 (OL 37 STAS 500/2)	Clasa de calitate	Compoziția chimică - % max.			
	2	C	Mn	P	S
		0,22	0,85	0,055	0,055

Tabel 2.2. – Caracteristici mecanice date de producător pentru S 235 – SR EN 10025  $g=3$  mm

S 235 – SR EN 10025 (OL 37 STAS 500/2)	Clasa de calitate	Limita de curgere	Rezistența la	Alungirea la
		$R_p 0,2$ N/mm <sup>2</sup> (kgf/ mm <sup>2</sup> )	tracțiune	rupere
	2	240 (24)	R <sub>m</sub> , min, N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	A, min %
			360 ... 440 (37 ... 45)	25

### 2.2.3. Descrierea desfășurării programului experimental

În cadrul programului experimental au fost realizate tăieturi drepte pe table de oțel nealiat. Tăieturile au fost realizate fără desprinderea părților piese, începând de la muchia tablei. Astfel s-a putut realiza măsurarea lățimii tăieturii. Au fost realizate 120 de tăieturi pe 10 plăci separate. Între tăieturi a fost lăsat un interval de 40 mm. Fiecare tăietură a fost numerotată cu poansonul pe partea superioară (figura 2.5.). Sunt prezentate primele două plăci SR EN 10025,  $g=3$  mm, după procesarea laser, plăcile 3 - 10 fiind prezentate în Anexa nr. 3.

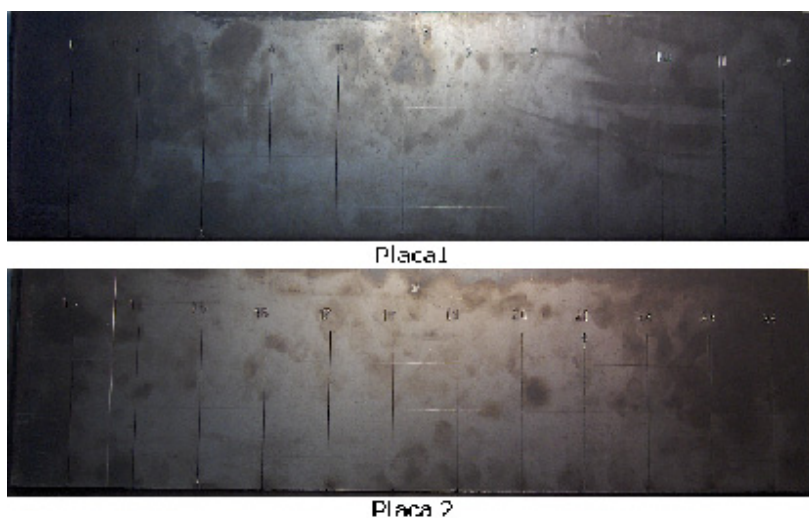


Figura 2.5. – Plăci cu tăieturile laser experimentale realizate

Factorii menținuți constanți în tipul experimentărilor au fost:

- iradierea cu fascicul laser în regim pulsant;
- gazul asistent CO<sub>2</sub> cu o puritate de 99,8%;
- diuza circulară cu un diametru de 1,2 mm;
- lentila de focalizare a fascicolului a avut o distanță focală de 75 mm ceea ce a produs un spot circular cu diametrul de 0,2 mm;
- materialul iradiat S235 – SR EN 10025 (OL 37 – STAS 500/2), cu grosimea de 3 mm.

Nu s-au realizat cercetări asupra distribuției intensității fasciculului laser (modul TEM) și nici asupra variației temporale a intensității fasciculului laser în cadrul pulsului. Nu s-a investigat direct poziția planului focal în raport cu suprafața piesei. În experimente poziția planului focal în raport cu suprafața piesei a variat prin modificarea distanței dintre diuză și piesă. Prelucrarea s-a realizat fără a separa piesele complet (cu scopul de a se executa măsurarea dimensiunilor tăieturilor). Lungimea tăieturilor de 100 mm s-a considerat suficientă pentru a evalua caracteristicile geometrice și structurale. Pentru majoritatea tăieturilor procesul de tăiere a fost filmat și fotografiat digital.

### 2.3. Condiții experimentale particulare

Cercetarea experimentală pornește de la considerarea unui număr restrâns de parametri care sunt semnificativi pentru controlul, evaluarea și realizarea procesului de prelucrare laser. Pentru cercetarea experimentală există două probleme distincte și anume: selecția parametrilor și selecția nivelelor (valorilor) pentru ca să se producă variația măsurabilă a funcțiilor obiectiv.

Tăierea laser asistată de oxigen este un proces tehnologic care implică prezența a numeroși parametri cu multiple interacțiuni între aceștia. Cercetarea experimentală propusă abordează două aspecte importante și anume:

- condițiile de iradiere;



- condițiile în care gazul asistent – oxigenul, este suflat către suprafața piesei.

Partea de iradiere a materialului este complet determinată de parametrii considerații iar pentru caracterizarea jetului de oxigen se selectează doi parametrii importanți. Schema procesului de tăiere cu parametrii modificați în cadrul programului experimental este prezentată în figura 2.6.:

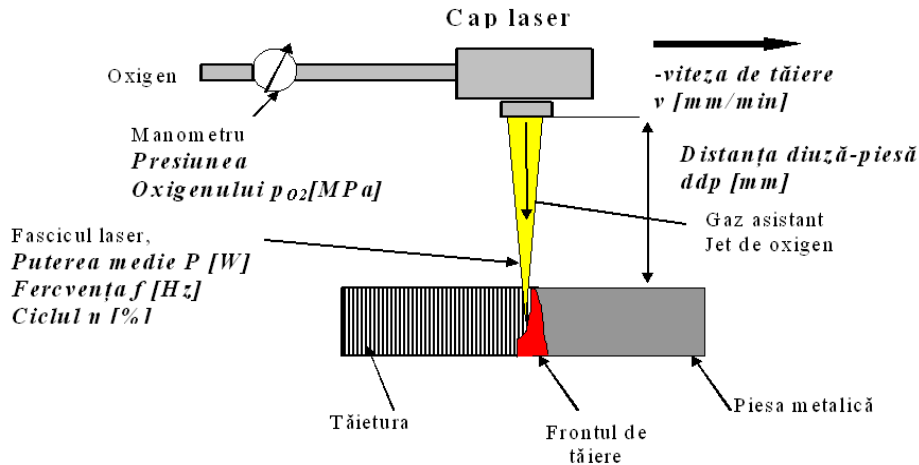


Figura 2.6. – Parametrii modificați în experimente

Parametrii modificați în cadrul programului experimental au fost:

1. Presiunea oxigenului  $p_{O_2}$  [MPa] este un parametru de proces, a fost măsurată la ieșirea din rezervor. Ea are o influență directă asupra vitezei gazului în tăietură și asupra reacției chimice de ardere a materialului.
2. Puterea medie  $P$  [W], este reglabilă direct pe instalație.
3. Viteza de tăiere  $v$  [mm/min], reprezintă viteza relativă de deplasare a capului laser față de piesa de prelucrat. Influența ei este considerabilă atât asupra procesului în general cât și asupra iradierii. Este reglabilă direct pe instalație.
4. Frecvența pulsurilor  $f$  [Hz], reprezintă numărul de pulsuri pe unitatea de timp. Este reglabilă direct pe instalație.
5. Ciclul  $\eta$  [%], reprezintă raportul dintre durata pulsului și durata totală între două deschideri ale pulsului. Este reglabil direct pe instalație.
6. Distanța diuză-piesă  $ddp$  [mm], reprezintă distanța dintre capul laser și suprafața superioară a piesei de prelucrat.

Cei șase parametri variați pot fi clasificați după cum urmează:

- a) - parametrii care influențează iradierea materialului: puterea medie, viteza de tăiere, ciclul, frecvența de pulsare;
- b) - parametrii care influențează procesul în general: presiunea oxigenului, viteza de tăiere, distanța diuză-piesă.

Pentru următorii parametri: presiunea oxigenului, puterea laserului, viteza de tăiere, frecvența și ciclul s-a efectuat o cercetare experimentală extinsă. Instalația folosită fiind dotată cu comandă numerică, variația acestor parametri a fost realizată prin programul de lucru.



La aceasta s-a adăugat variația distanței dintre diuză și piesă, fiind considerată pentru două valori,  $ddp = 1\text{mm}$ , respectiv  $ddp = 2\text{mm}$ . Distanța diuză-piesă influențează atât poziția planului focal în raport cu suprafața piesei cât și curgerea gazului la frontul de eroziune. Distanța diuză-piesă este reglabilă direct pe instalație. Acest parametru influențează atât condițiile de iradiere cât și cele de curgere a oxigenului la frontul de tăiere. Pentru acest parametru s-au considerat două nivele separate, fără a se stabili o variație pe un domeniu experimental mai larg.

Folosirea unui regim de iradiere pulsant în procesele de tăiere laser se justifică prin nivelul ridicat al intensității fasciculului laser care se obține. Folosirea unui regim de iradiere pulsant înseamnă că iradierea va fi controlată de mai mulți parametri. Condițiile de iradiere sunt date de intensitatea fasciculului laser și de durata de interacțiune între radiația laser și material. Intensitatea fasciculului laser se consideră relativ la pata focală. În acest caz ea este controlată direct de parametrul de putere. Analiza rezultatelor experimentale a fost realizată relativ la intensitatea fasciculului laser în pata focală. În unele cazuri efectele termice depind de intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei, care este determinată de putere și de distanța diuză-piesă, parametru a cărui variație modifică defocalizarea.

Regimul pulsant introduce trei parametri care modifică durata de interacțiune între radiația laser și material: viteza de tăiere, ciclul și frecvența. Durata de interacțiune dintre radiația laser și material crește cu ciclul și frecvența și scade cu viteza de tăiere. Efectul acestor parametri nu este unitar. Rezultatele experimentale au arătat că întotdeauna unul din acești parametri arată un efect important, restul arată efecte secundare. Se arară astfel, că studiul efectelor celor trei parametri care controlează durata de interacțiune între radiația laser și material și a interacțiunii între acești parametri, se formulează ca o problemă separată.

Independent de parametri care controlează iradierea, apare presiunea oxigenului. Presiunea oxigenului este măsurată la intrarea în capul laser. Există o proporționalitate între presiunea oxigenului și viteza de curgere a gazului la suprafața piesei și la frontul de eroziune. Presiunea oxigenului caracterizează astfel utilizarea gazului asistent în procesul de tăiere.

## 2.4. Organizarea programului experimental

Programele experimentale cu valorile tuturor parametrilor de proces sunt prezentate în tabelele 2.3. și 2.4. Mărimile variate în cadrul unei serii a experimentării clasice sau diferența între serii omoloage este marcată cu caractere îngroșate.

Tabel 2.3. - Valorile mărimilor utilizate în programul experimental

Încercarea	Puterea $P$ [W]	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	ciclul $\eta$ [%]	Frecvența $f$ [Hz]	Presiunea Oxigenului $pO_2$ [ $10^{-2}$ MPa]	Distanța diuză-
Experimentare de tip clasic						
S1 Variația presiunii oxigenului						
1	1500	2500	85	500	<b>0,6</b>	1
2	1500	2500	85	500	<b>0,8</b>	1
3	1500	2500	85	500	<b>1,2</b>	1
4	1500	2500	85	500	<b>1,6</b>	1
5	1500	2500	85	500	<b>2</b>	1
S2 Variația puterii laserului						
6	<b>300</b>	2500	85	500	0,8	1
7	<b>500</b>	2500	85	500	0,8	1
8	<b>800</b>	2500	85	500	0,8	1
9	<b>1000</b>	2500	85	500	0,8	1
10	<b>1200</b>	2500	85	500	0,8	1
S3 Variația vitezei de tăiere						
11	1500	<b>300</b>	85	500	0,8	1
12	1500	<b>800</b>	85	500	0,8	1
13	1500	<b>1300</b>	85	500	0,8	1
14	1500	<b>3000</b>	85	500	0,8	1
15	1500	<b>4000</b>	85	500	0,8	1
S4 Variația frecvenței						
16	1500	2500	85	<b>80</b>	0,8	1
17	1500	2500	85	<b>150</b>	0,8	1
18	1500	2500	85	<b>250</b>	0,8	1
19	1500	2500	85	<b>400</b>	0,8	1
20	1500	2500	85	<b>600</b>	0,8	1
S5 Variația randamentului (ciclul)						
21	1500	2500	<b>20</b>	500	0,8	1
22	1500	2500	<b>50</b>	500	0,8	1
23	1500	2500	<b>60</b>	500	0,8	1
24	1500	2500	<b>70</b>	500	0,8	1
25	1500	2500	<b>95</b>	500	0,8	1
S6 Variația presiunii gazului						
26	1500	2500	85	500	<b>0,6</b>	2
27	1500	2500	85	500	<b>1,2</b>	2
28	1500	2500	85	500	<b>2</b>	2
S7 Variația puterii laserului						
29	<b>300</b>	2500	85	500	0,8	2
30	<b>800</b>	2500	85	500	0,8	2
S8 Variația vitezei de tăiere						
31	<b>1200</b>	2500	85	500	0,8	2
32	1500	<b>300</b>	85	500	<b>0,8</b>	2
33	1500	<b>1300</b>	85	500	<b>0,8</b>	2
34	1500	<b>3000</b>	85	500	<b>0,8</b>	2
S9 Variația frecvenței						
35	1500	2500	85	<b>80</b>	0,8	2
36	1500	2500	85	<b>250</b>	0,8	2
37	1500	2500	85	<b>600</b>	0,8	2
S10 Variația randamentului (ciclul)						
38	1500	2500	<b>50</b>	500	0,8	2
39	1500	2500	<b>70</b>	500	0,8	2
40	1500	2500	<b>95</b>	500	0,8	2
Experimentare de tip factorial						
E1 Metoda planificării experienței 2 <sup>5</sup>						
41	1500	3000	85	400	2	1
42	1500	3000	85	400	0,8	1
43	1500	3000	85	150	2	1
44	1500	3000	85	150	0,8	1
45	1500	3000	50	400	2	1
46	1500	3000	50	400	0,8	1
47	1500	3000	50	150	2	1
48	1500	3000	50	150	0,8	1
49	1500	1300	85	400	2	1
50	1500	1300	85	400	0,8	1
51	1500	1300	85	150	2	1
52	1500	1300	85	150	0,8	1
53	1500	1300	50	400	2	1
54	1500	1300	50	400	0,8	1
55	1500	1300	50	150	2	1
56	1500	1300	50	150	0,8	1
57	800	3000	85	400	2	1
58	800	3000	85	400	0,8	1
59	800	3000	85	150	2	1
60	800	3000	85	150	0,8	1

Tabel 2.4. – Valorile mărimilor utilizate în programul experimental

Încercarea	Puterea $P$ [W]	Viteza de taiere $v$ [mm/min]	ciclul $\eta$ [%]	Frecvența $f$ [Hz]	Presiunea Oxygenului $pO_2$ [ $10^{-1}$ MPa]	Dis tanța diuză- piesă [mm]
E1 Metoda planificării experienței $2^2$ (continuare)						
61	800	3000	50	400	2	1
62	800	3000	50	400	0,8	1
63	800	3000	50	150	2	1
64	800	3000	50	150	0,8	1
65	800	1300	85	400	2	1
66	800	1300	85	400	0,8	1
67	800	1300	85	150	2	1
68	800	1300	85	150	0,8	1
69	800	1300	50	400	2	1
70	800	1300	50	400	0,8	1
71	800	1300	50	150	2	1
72	800	1300	50	150	0,8	1
Replici în punctul central						
73	1100	2100	75	250	1,4	1
74	1100	2100	75	250	1,4	1
75	1100	2100	75	250	1,4	1
76	1100	2100	75	250	1,4	1
77	1100	2100	75	250	1,4	1
Verificare în afara domeniului experimental						
78	1100	500	75	250	1,4	1
79	1100	500	75	250	1,4	1
80	1100	4000	75	250	1,4	1
81	1100	4000	75	250	1,4	1
Verificare în domeniului experimental						
82	1100	1000	75	250	1,4	1
83	1100	1000	75	250	1,4	1
84	1100	2500	75	250	1,4	1
85	1100	2500	75	250	1,4	1
Experimentare de tip factorial						
E2 Metoda planificării experienței $2^{5-2}$						
86	1500	3000	85	400	2	2
87	1500	3000	50	150	0,8	2
88	1500	1300	85	150	2	2
89	1500	1300	50	400	0,8	2
90	800	3000	50	400	2	2
91	800	3000	85	150	0,8	2
92	800	1300	50	150	2	2
93	800	1300	85	400	0,8	2
Verificare în punctul central						
94	1100	2100	75	250	1,4	2
95	1100	2100	75	250	1,4	2
Experimentare de tip clasic						
S11 Experimente suplimentare, efectul presiunii oxygenului, iradiere puternica						
96	1500	900	90	500	<b>0,6</b>	1
97	1500	900	90	500	<b>0,8</b>	1
98	1500	900	90	500	<b>1,2</b>	1
99	1500	900	90	500	<b>1,6</b>	1
100	1500	900	90	500	<b>2</b>	1
S12 Experimente suplimentare, efectul oxygenului, iradiere slabă						
101	700	900	90	500	<b>0,6</b>	1
102	700	900	90	500	<b>0,8</b>	1
103	700	900	90	500	<b>1,2</b>	1
104	700	900	90	500	<b>1,6</b>	1
105	700	900	90	500	<b>2</b>	1
S13 Folosirea unui regim cu pulsuri lungi, variația presiunii oxygenului						
106	1500	900	50	20	<b>0,6</b>	1
107	1500	900	50	20	<b>0,8</b>	1
108	1500	900	50	20	<b>1,2</b>	1
109	1500	900	50	20	<b>1,6</b>	1
110	1500	900	50	20	<b>2</b>	1
S14 Folosirea unui regim cu pulsuri lungi, variația vitezei 1						
111	1500	<b>300</b>	50	20	<b>0,8</b>	1
112	1500	<b>600</b>	50	20	<b>0,8</b>	1
113	1500	<b>1200</b>	50	20	<b>0,8</b>	1
114	1500	<b>1500</b>	50	20	<b>0,8</b>	1
115	1500	<b>2500</b>	50	20	<b>0,8</b>	1
S15 Folosirea unui regim cu pulsuri lungi, variația vitezei 2						
116	1500	<b>300</b>	50	20	<b>2</b>	1
117	1500	<b>600</b>	50	20	<b>2</b>	1
118	1500	<b>1200</b>	50	20	<b>2</b>	1
119	1500	<b>1500</b>	50	20	<b>2</b>	1
120	1500	<b>2500</b>	50	20	<b>2</b>	1

## **2.5. Tipuri de programe experimentale**

Programul experimental realizat a urmărit obiective multiple. Structurarea programului experimental s-a realizat pe două tipuri de experimentări:

- experimentare clasică ;
- experimentare factorială.

Experimentarea clasică constă în variația unei singur parametru. Se consideră mai multe valori egal depărtate ale aceluși parametru pe domeniul experimental. Experimentarea de tip factorial consideră variația simultană a mai mulți parametri. Experimentările constă în combinații ale valorilor parametrilor denumite în acest caz și nivele ale parametrilor.

### **2.5.1. Experimentări de tip clasic**

Au fost utilizate seriile experimentale, iar fiecare serie are 5 puncte experimentale:

- Seria S1: modificarea presiunii oxigenului;
- Seria S2: modificarea puterii medii;
- Seria S3: modificarea vitezei de tăiere;
- Seria S4: modificarea frecvenței de pulsare;
- Seria S5: modificarea ciclului.

Seriile experimentale pun în evidență tendința de variație a parametrilor respectivi, pentru poziția diuză-piesă de 1mm. Întreaga procedură experimentală a fost repetată pentru poziția diuză-piesă de 2 mm, cu 3 puncte experimentale:

- Seria S6: modificarea presiunii oxigenului;
- Seria S7: modificarea puterii medii;
- Seria S8: modificarea vitezei de tăiere;
- Seria S9: modificarea frecvenței de pulsare;
- Seria S10: modificarea ciclului.

Seriile S11 și S12 au ca factor de variație presiunea oxigenului prima în condițiile unei puterii medii reduse iar a doua în condițiile unei puterii medii ridicate. Viteza de tăiere a fost menținută la o valoare relativ coborâtă pentru a da consistență iradierii materialului. S-a dorit ca nivelul de iradiere să fie reprezentat de puterea medie.

Seriile S13, S14, S15 au modificat timpul pulsului prin alegerea unei combinații diferite între frecvența pulsurilor și ciclu. Prin stabilirea ciclului la 50% s-a asigurat ca durata pulsului să fie egal cu durata de închidere. Prin scăderea semnificativă a frecvenței de pulsare s-a asigurat mărirea duratei pulsului. Pentru această combinație s-a studiat modificarea presiunii oxigenului S13. Apoi s-a studiat modificarea vitezei de tăiere în condițiile unei presiuni minime a oxigenului S14 respectiv pentru o presiune maximă a oxigenului S15.

### **2.5.2. Experimentări de tip factorial**

Metoda experimentărilor factoriale constă în stabilirea de nivele pentru fiecare din mărimile variate (factori de influență). Experimentările realizate au propus 5 factori de influență (puterea medie, viteza de tăiere, ciclul, frecvența de pulsare, presiunea oxigenului) pentru fiecare din acești factori s-au stabilit două nivele, unul inferior (minim) iar celălalt superior (maxim). Experimentul factorial

constă în alegerea valorilor parametrilor astfel fiecărui nivel al unui factor  $i$  se asociază toate combinațiile posibile între nivelele celorlalți factori. Este o organizare de tipul „fiecare cu fiecare”. Dacă organizarea se extinde asupra tuturor factorilor de influență atunci experimentul se numește „experiment factorial complet”. Numărul încercărilor pentru un experiment factorial complet  $k^n$  unde  $k$  este numărul de nivele iar  $n$  numărul de factori de influență.

Acesta înseamnă un număr mare de încercări experimentale, dacă se consideră un număr mare de factori de influență cu multe nivele. În aceste condiții se folosește o reducere a numărului factorilor de influență, o parte din factori sunt considerați secundari și îndepărtați din tipul împerecherilor „fiecare cu fiecare”, pentru ei nu se alege o singură valoare pentru fiecare factor (cum ar fi în cazul unei experimentării clasice) ci valori diferite (corespunzătoare la nivele diferite) printr-o procedură în care nivelele factorilor secundari se suprapun peste nivele ale interacțiunilor între factorii principali. Se aplică principiul conform căruia interacțiunile între factorii de influență (principali) se comportă ca noi factori de influență. Aceștia sunt identificați cu factorii de influență secundari. Acesta este tipul de „experiment factorial incomplet”. În planul experimental s-a inclus un plan experimental pentru experiment factorial complet și un plan experimental pentru experiment factorial incomplet.

Planul experimental E1 a considerat o organizare de tipul „plan factorial complet”  $2^5$  adică 5 factorii de influență cu câte două nivele fiecare. În total au fost necesare 32 de încercări (încercările 41-72). Acestea au constituit matricea experimentului (tabele 2.3. și 2.4.). La acestea s-au adăugat o serie de experimentări necesare aplicării unor proceduri de prelucrare statistică. Acestea sunt necesare pentru a stabili gradul de încredere în formulele de corelație obținute pe baza datelor din experimentări. Se definește astfel „punctul central al experimentului”, acea combinație de valori pentru nivelele factorilor de influență care se situează pentru fiecare din factori la jumătatea intervalului dintre nivelul minim și cel maxim al factorului respectiv. Dacă valorile rezultate în urma calculului nu sunt reglabile experimental, se consideră valori apropiate de acestea. Pentru acest punct central se efectuează un număr de replici.

Acestea definesc „reproductibilitatea experimentală”. Astfel se pot observa variațiile care intervin în mărimile măsurate (funcțiile obiectiv), în cazul efectuării experimentului în condiții identice (din punctul de vedere al parametrilor variații, factorilor de influență și a parametrilor constanți). Astfel se va observa abaterea experimentală datorită producerii unor fenomene aleatorii necontrolabile. Se consideră că aceasta afectează toate încercările, și încercările pentru care nu s-au efectuat replici. Pe de altă parte, este nevoie de o verificare a predicției formulelor de corelație în raport cu rezultate provenite din încercări experimentale care nu au fost folosite la stabilirea acelor corelații. Această verificare se face în punctul central. În acesta se vor înregistra cele mai mari abateri fiind egal depărtat de valorile pentru fiecare încercare în parte, unde coincidența va fi perfectă deoarece aceste valori au fost folosite la deducerea formulei. Abaterea obținută va defini o încredere generalizată asupra valorilor prezise de formula de corelație pe tot domeniul experimental între (nivelul minim și maxim al fiecărui factor). Numărul încercărilor în punctul central se adaptează la numărul total de experimentări. Astfel s-au efectuat un număr de 5 replici în punctul central reprezentate de încercările 73-77.

Problema verificărilor a fost extinsă și pentru alte puncte în afara celui central pentru a da consistență abordărilor statistice. Pentru aceste verificări s-au efectuat numai două replici. Acestea s-au efectuat numai pentru unul din cei cinci factori de influență și anume viteza de tăiere. Punctele suplimentare pentru care s-

au efectuat replici au fost situate pe o linie care conține punctul central. Aceasta înseamnă că în afară de viteza de tăiere ceilalți parametri au fost cei din punctul central. Pentru viteza de tăiere mai mică decât cea din punctul central o valoare este situată în afara domeniului experimental (încercările 78-79), iar altă valoare în domeniul experimental la marginea acestuia (încercările 82-83). Pentru viteza de tăiere mai mare decât cea din punctul central o valoare este situată în afara domeniului experimental (încercările 80-81), iar altă valoare în domeniul experimental la marginea acestuia (încercările 84-85). Astfel, în total, sunt patru puncte de încercare suplimentare, două în domeniul experimental și două în afara acestuia. Toate experimentele efectuate pe planul factorial complet  $E1$  au avut reglată distanța dintre diuză și piesă la 1 mm.

Planul experimental  $E2$  este de tip „plan factorial incomplet”  $2^{5-2}$  (5 factori de influență, 2 nivele pentru fiecare factor, 2 factori secundari (frecvența și presiunea oxigenului). Matricea experimentului are un număr de 8 încercări (86-93) la fel ca și un experiment factorial complet  $2^3$ . Matricea experimentului este prezentată în tabelul. Nivele factorilor de influență au fost cele de la experimentul  $E1$ . S-a modificat numai distanța dintre piesă și diuză. Ea a fost constantă pentru toate încercările și stabilită la 2 mm. În punctul central s-au efectuat două replici (încercările 94-95).

Comparativ cu experimentarea de tip clasic unde se studiază efectul unui singur factor, metoda experimentelor factoriale permite studiul interacțiunii dintre factorii de influență. De asemenea aceasta permite, datorită numărului mare de încercări experimentale, diferite organizări ale acestora pentru a realiza diferite formule de corelație. Dintre acestea, cele care prezintă un coeficient de corelație ridicat sunt de încredere și pot fi folosite la evaluarea influenței modificării parametrilor cu scopul de a obține un efect dorit. Prin eliminarea unuia din factorii de influență (pentru experimentul factorial complet) se obțin două planuri complete de ordin inferior.

Efectuarea încercărilor după planurile factoriale permite multiple posibilități de analiză. Prelucrarea datelor experimentale s-a realizat folosind programul STATGRAPHICS, care permite rezolvarea sistemelor liniare care intervin în deducerea funcțiilor de corelație. Deducerea acestor funcții de corelație este însoțită de trasarea diagramelor PARETO care fac o ierarhie a factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia. Programul trasează automat „suprafețe de răspuns”, ca reprezentări „prin puncte” ale unei funcții cu două variabile. Nivelul de încredere se calculează referitor la replicile realizate în punctul central al experimentului factorial. Analiza statistică este dată de tabelele ANOVA. Acestea vor evidenția semnificația factorilor de influență prin încadrarea predicției variației în probabilitatea de 95%, fiind realizat cu ajutorul diagramelor PARETO STANDARDIZAT. Încrederea în puterea corelației este dată de formula coeficientului de corelație.

Prelucrarea datelor experimentale a urmat proceduri prezentate și exemplificate în lucrările [Cicală, 2005], [Cicală 1996 a], [Cicală 1999], [Ostle, 1975], [Pearsică, 2006].

În această parte, cei cinci parametri modificați se vor numi factori de influență, iar cele patru mărimi măsurate se vor numi funcții obiectiv. Asupra factorilor de influență se cere să fie mărimi care să poată fi variate continuu (sau cel puțin ipoteza variației continue să fie sustenabilă). De obicei, se aleg principalele reglaje ale mașinii. Metoda experimentelor factoriale permite studiul mai multor funcții obiectiv. Studiul unei funcții obiectiv este independent de al celorlalte. În general, se preferă o procedură similară de studiu pentru fiecare din funcțiile

obiectiv. Funcțiile obiectiv sunt fie mărimi măsurate direct, fie sunt calculate pe baza unor formule pornind de la mărimi măsurate direct. Metodele de analiză folosite în experimentele factoriale sunt independente de modul în care au fost obținute și semnificația acestor valori. Astfel este important ca înainte de a trece la analiză valorile funcțiilor obiectiv să poată fi considerate „exacte și corecte”.

Studiul pe planele factoriale are ca obiectiv principal considerarea interacțiunilor dintre factori. Acestea nu pot fi studiate în cadrul experimentărilor clasice. Din punct de vedere matematic, interacțiunea dintre doi factorii de influență se scrie ca produsul celor doi factori, produs care este tratat ca o variabilă independentă. Prin aceasta se asigură faptul că există proporționalitate între variația fiecărui factor și variația interacțiunii. Formula de corelație este o relație matematică care leagă funcția obiectiv de factorii de influență. Aceasta este uneori numită și „model matematic”. Planul factorial complet este astfel conceput încât să conțină un număr suficient de încercări care să permită realizarea unei formule care exprimă funcția obiectiv prin sumarea valorilor pentru factorii de influență și interacțiunile dintre acestea (înmulțite fiecare cu un coeficient) la care se adaugă o constantă ca și termen liber.

Exprimarea valorilor pentru factorii de influență într-un sistem arbitrar (echivalent cu exprimarea în aceleași unități de măsură) duce la coeficienții care înmulțesc factorii de influență și interacțiunile să fie comparabili. Astfel se va putea prin compararea valorilor în modul ale acestora să se facă o ierarhie a factorilor de influență.

Tabel 2.5. – Funcțiile de transformare directe și inverse

Factorul de influență	Funcția de transformare directă	Funcția de transformare inversă
Puterea medie	$A = -3.285 + 0.00285P$ [-]	$P = 1152.6 + 350A$ [W]
Viteza de tăiere	$B = -2.529 + 0.00117v$ [-]	$v = 2161.5 + 850B$ v[mm/min]
Ciclul	$C = -3.857 + 0.0571\eta$ [-]	$\eta = 67.54 + 17.5C$ [%]
Frecvența de pulsare	$D = -2.2 + 0.008f$ [-]	$f = 275 + 125D$ [Hz]
Presiunea oxigenului $pO_2$	$E = -2.33 + 1.66pO_2$ [-]	$pO_2 = 1.34 + 0.6E$ [ $10^{-1}$ MPa]

Tabel 2.6. – Nivelurile factorilor de influență

Mărimile reale			Mărimile în sistemul codificat		
Factorul de influență	Nivelul inferior	Nivelul superior	Factorul de influență	Nivelul inferior	Nivelul superior
Puterea medie $P [W]$	800	1500	A [-]	-1	+1
Viteza de tăiere $v [mm/min]$	1300	3000	B [-]	-1	+1
Ciclul $\eta [%]$	50	85	C [-]	-1	+1
Frecvența $f [Hz]$	150	400	D [-]	-1	+1
Presiunea Oxigenului $pO_2 [10^{-1} MPa]$	0.8	2	E [-]	-1	+1

Tipul de experimentare propusă, a considerat pentru fiecare factor de influență, două nivele, unul inferior care a fost desemnat prin atribuirea valorii adimensionale  $-1$  iar celălalt superior căruia i-a fost atribuită valoarea  $+1$ . În această situație, valorile reale ale factorilor de influență se transpun în sistemul codificat.

Principiul de transformare este următorul: pentru fiecare mărime variată (factor de influență) se identifică valoarea minimă cu  $-1$  iar cea maximă cu  $+1$ . Pe baza acestora se stabilește o lege de variație care menține proporționalitatea. Notând cu  $x$  valorile codificate (adimensionale) și cu  $X$  valorile reale, avem următoarea relație de transformare:

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2.1.)$$

În toate cazurile studiate  $x_{\min} = -1$  și  $x_{\max} = +1$  vom avea calculele:

Pentru **puterea medie**  $P[W]$

$$A = -1 + \frac{P - 800}{1500 - 800} \cdot [1 - (-1)] = -1 + \frac{P - 800}{700} \cdot 2 [-] \quad (2.2.)$$

Pentru **viteza de tăiere**  $v [mm/min]$

$$B = -1 + \frac{v - 1300}{3000 - 1300} \cdot [1 - (-1)] = -1 + \frac{v - 1300}{1700} \cdot 2 [-] \quad (2.3.)$$

Pentru **ciclul**  $\eta [%]$

$$C = -1 + \frac{\eta - 50}{85 - 50} \cdot [1 - (-1)] = -1 + \frac{\eta - 50}{35} \cdot 2 [-] \quad (2.4.)$$



Pentru **frecvența de pulsare**  $f$  [Hz]

$$D = -1 + \frac{f - 150}{400 - 150} \cdot [1 - (-1)] = -1 + \frac{f - 150}{250} \cdot 2 [-] \quad (2.5.)$$

Pentru **presiunea oxigenului**  $pO_2$  [MPa]

$$E = -1 + \frac{pO_2 - 0.8}{2 - 0.8} \cdot [1 - (-1)] = -1 + \frac{pO_2 - 0.8}{1.2} \cdot 2 [-] \quad (2.6.)$$

Aceste calcule conduc la relațiile prezentate în tabelul 2.5. Matricele experimentelor factoriale sunt date în tabele 2.7. și 2.8.

Tabel 2.7. - Matricea experimentului factorial complet  $2^5$

Nr. crt.	Tăietura	A	B	C	D	E	Nr. crt.	Tăietura	A	B	C	D	E
1	72	-1	-1	-1	-1	-1	17	71	-1	-1	-1	-1	+1
2	56	+1	-1	-1	-1	-1	18	55	+1	-1	-1	-1	+1
3	64	-1	+1	-1	-1	-1	19	63	-1	+1	-1	-1	+1
4	48	+1	+1	-1	-1	-1	20	47	+1	+1	-1	-1	+1
5	68	-1	-1	+1	-1	-1	21	67	-1	-1	+1	-1	+1
6	52	+1	-1	+1	-1	-1	22	51	+1	-1	+1	-1	+1
7	60	-1	+1	+1	-1	-1	23	59	-1	+1	+1	-1	+1
8	44	+1	+1	+1	-1	-1	24	43	+1	+1	+1	-1	+1
9	70	-1	-1	-1	+1	-1	25	69	-1	-1	-1	+1	+1
10	54	+1	-1	-1	+1	-1	26	53	+1	-1	-1	+1	+1
11	62	-1	+1	-1	+1	-1	27	61	-1	+1	-1	+1	+1
12	46	+1	+1	-1	+1	-1	28	45	+1	+1	-1	+1	+1
13	66	-1	-1	+1	+1	-1	29	65	-1	-1	+1	+1	+1
14	50	+1	-1	+1	+1	-1	30	49	+1	-1	+1	+1	+1
15	58	-1	+1	+1	+1	-1	31	57	-1	+1	+1	+1	+1
16	42	+1	+1	+1	+1	-1	32	41	+1	+1	+1	+1	+1

Tabel 2.8. - Matricea experimentului factorial incomplet  $2^{5-2}$

Nr. crt.	Tăietura	A	B	C	D	E
1	92	-1	-1	-1	-1	-1
2	89	+1	-1	-1	-1	-1
3	90	-1	+1	-1	-1	-1
4	87	+1	+1	-1	-1	-1
5	93	-1	-1	+1	-1	-1
6	88	+1	-1	+1	-1	-1
7	91	-1	+1	+1	-1	-1
8	86	+1	+1	+1	-1	-1

## 2.6. Caracterizarea condițiilor de iradiere

Regimul pulsat folosit la iradierea materialului este caracterizat prin alți parametri decât cei reglați experimental prin comenzile sistemului tehnologic laser. Pulsul laser este reprezentat prin variația în timp a puterii date de oscilatorul laser. Emisia radiației în regim pulsat se prezintă ca o succesiune de intervale de timp în care se emite radiație, pulsul laser, separate de intervale de timp în care nu se emite radiație. În figura 2.8., sunt prezentate mărimile care caracterizează emisia radiației în regim pulsat, pentru o formă dreptunghiulară a pulsului laser. În cele ce urmează vor fi definite mărimile care caracterizează regimul pulsat.

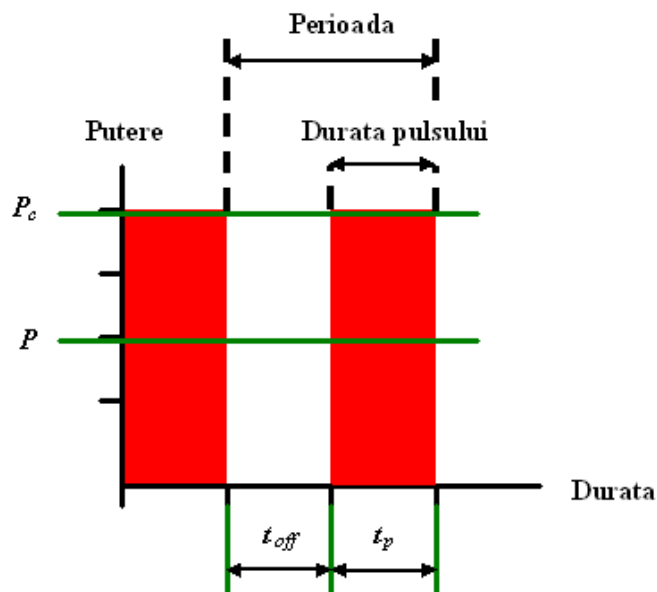


Figura 2.8. – Mărimile regimului pulsat

**Puterea de vârf  $P_c$ [W]**, reprezintă puterea maximă a fascicului laser care este emisă în timpul pulsului. Puterea medie reprezintă puterea emisă de oscilatorul laser într-un timp îndelungat în situația în care emisia este continuă, considerând puterea emisă în timpul pulsului ca fiind uniform repartizată pe timpul iradierii. Puterea de vârf se calculează pe baza relației sale cu puterea medie. Puterea de vârf se definește ca fiind raportul:

$$P_c = \frac{P}{\eta} \text{ [W]} \quad (2.7.)$$

**Durata pulsului  $t_p$ [s]**, reprezintă durata iradierii, fiind calculată pe baza definiției ciclului.

$$t_p = \frac{\eta}{f} \text{ [s]} \quad (2.8.)$$

**Energia pe puls  $E_p$  [J]**, reprezintă energia emisă în timpul pulsului, fiind calculată ca raportul dintre puterea medie și frecvență.

$$E_p = P_c \cdot t_p = \frac{P}{f} \text{ [J]} \quad (2.9.)$$

**Intensitatea fascicului laser  $I$  [W/cm<sup>2</sup>]** (intensitatea medie este estimată în pata focală considerată circulară și în timpul pulsului):

$$I = \frac{E_p}{t_p \cdot \left(\pi \frac{D^2}{4}\right)} = \frac{P_c}{\pi \frac{D^2}{4}} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (2.10.)$$

Pe unele sisteme tehnologice cu fascicol laser cu CO<sub>2</sub>, sistemul de comandă permite direct reglarea energiei pe puls și a frecvenței de pulsare, puterea medie fiind calculate în funcție de acestea. În cazul experimentelor realizate s-a reglat direct puterea medie și frecvența de pulsare, energia pe puls fiind determinate de aceasta. Cunoașterea pentru regimul de iradiere pulsant a valorii pentru ciclu și a frecvenței de pulsare permite calcularea următoarelor mărimi:

**Perioada  $t_c$  [s]**, reprezintă timpul în care variază iradierea în regim pulsant, fiind compusă din timpul pulsului și timpul de închidere a pulsului. Perioada se calculează ca fiind inversul frecvenței de pulsare.

$$t_c = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad (2.11)$$

**Durata pulsului  $t_p$  [s]**, reprezintă timpul în care are loc iradierea sau timpul de funcționare al oscilatorului laser. În funcție de ciclu și de frecvență timpul pulsului este dat de relația următoare:

$$t_p = \frac{\eta}{f} \text{ [s]} \quad (2.12.)$$

**Durata de închidere a pulsului  $t_{off}$  [s]**, reprezintă timpul în care oscilatorul laser nu emite radiație, apărând în relațiile obținute din:

$$\eta = \frac{t_p}{t_p + t_{off}} = t_p \cdot f \quad [\%] \quad (2.13.)$$

unde:

$$t_p + t_{off} = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad (2.14.)$$

În cazul programului experimental, se reglează direct ciclul, durata pulsului fiind o mărime derivată. Pe unele sisteme tehnologice laser acesta se reglează direct. Cunoașterea acestor două mărimi face ca regimul folosit în încercările respective să fie comparabil cu alte regimuri de iradiere.

Modul de variație a intensității în timpul pulsului (respectiv a puterii), forma pulsului nu a fost măsurată. S-a calculat o intensitate mediată pentru întregul interval al pulsului și pentru o distribuție constantă în pata focală considerată circulară. Utilitatea acestei mărimi constă în faptul că se pot face aprecieri asupra efectului termic care ia naștere în material.

Caracterizarea condițiilor de iradiere indiferent de caracteristicile pulsului laser, valabilă atât pentru iradierea în regim pulsant cât și pentru iradierea în regim continuu, se realizează prin introducerea energiei liniare.

**Energia liniară  $E_l$  [J/cm]**, reprezintă raportul între puterea medie și viteza de tăiere:

$$E_l = \frac{P}{v} \quad [\text{J /cm}] \quad (2.15.)$$

Pentru a caracteriza regimul de iradiere la nivel „elementar” sunt necesare următoarele mărimi:

- timpul pulsului și energia pe puls (pentru a caracteriza iradierea în regim pulsant);
- intensitatea fascicolului laser în pata focală (pentru a caracteriza condițiile de iradiere a piesei cu fascicul laser);
- energia liniară (pentru a caracteriza iradierea în cadrul procesului de iradiere).

Valorile pentru aceste mărimi calculate pentru condițiile experimentale în care s-au realizat tăieturile sunt prezentate în tabelele 2.9. și 2.10.

Tabel 2.9. - Parametrii regimului de iradiere pulsant

Încercarea	Energia pe puls [J]	Timpul pulsului [ms]	Energia liniară [J/cm]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]	Încercarea	Energia pe puls [J]	Timpul pulsului [ms]	Energia liniară [J/cm]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]
1	3	1.7	360	5.61	31	2.4	1.7	288	4.48
2	3	1.7	360	5.61	32	3	1.7	3000	5.61
3	3	1.7	360	5.61	33	3	1.7	692	5.61
4	3	1.7	360	5.61	34	3	1.7	300	5.61
5	3	1.7	360	5.61	35	18.7	10.6	360	5.61
6	0.6	1.7	72	1.12	36	6	3.4	360	5.61
7	1	1.7	120	1.87	37	2.5	1.4	360	5.61
8	1.6	1.7	192	2.99	38	3	1	360	9.54
9	2	1.7	240	3.74	39	3	1.4	360	6.81
10	2.4	1.7	288	4.48	40	3	1.9	360	5.02
11	3	1.7	3000	5.61	41	3.75	2.1	300	5.61
12	3	1.7	1125	5.61	42	3.75	2.1	300	5.61
13	3	1.7	692	5.61	43	10	5.6	300	5.61
14	3	1.7	300	5.61	44	10	5.6	300	5.61
15	3	1.7	225	5.61	45	3.75	1.2	300	9.54
16	18.7	10.6	360	5.61	46	3.75	1.2	300	9.54
17	10	5.6	360	5.61	47	10	3.3	300	9.54
18	6	3.4	360	5.61	48	10	3.3	300	9.54
19	3.75	2.1	360	5.61	49	3.75	2.1	692	5.61
20	2.5	1.4	360	5.61	50	3.75	2.1	692	5.61
21	3	0.4	360	23.85	51	10	5.6	692	5.61
22	3	1	360	9.54	52	10	5.6	692	5.61
23	3	1.2	360	7.95	53	3.75	1.2	692	9.54
24	3	1.4	360	6.81	54	3.75	1.2	692	9.54
25	3	1.9	360	5.02	55	10	3.3	692	9.54
26	3	1.7	360	5.61	56	10	3.3	692	9.54
27	3	1.7	360	5.61	57	2	2.1	160	2.99
28	3	1.7	360	5.61	58	2	2.1	160	2.99
29	0.6	1.7	72	1.12	59	5.33	5.6	160	2.99
30	1.6	1.7	192	2.99	60	5.33	5.6	160	2.99

Tabel 2.10. – Parametrii regimului de iradiere pulsant (continuare)

Încercarea	Energia pe puls [J]	Timpul pulsului [ns]	Energia liniară [J/cm]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]	Încercarea	Energia pe puls [J]	Timpul pulsului [ns]	Energia liniară [J/cm]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]
61	2	1.2	160	5.08	91	5.33	5.6	160	2.99
62	2	1.2	160	5.08	92	5.33	3.3	369	5.08
63	5.33	3.3	160	5.08	93	2	2.1	369	2.99
64	5.33	3.3	160	5.08	94	4.4	3	314	4.66
65	2	2.1	369	2.99	95	4.4	3	314	4.66
66	2	2.1	369	2.99	96	3	1.8	1000	5.3
67	5.3	5.6	369	2.99	97	3	1.8	1000	5.3
68	5.3	5.6	369	2.99	98	3	1.8	1000	5.3
69	2	1.2	369	5.08	99	3	1.8	1000	5.3
70	2	1.2	369	5.08	100	3	1.8	1000	5.3
71	5.3	3.3	369	5.08	101	1.4	1.8	466	2.47
72	5.3	3.3	369	5.08	102	1.4	1.8	466	2.47
73	4.4	3	314	4.66	103	1.4	1.8	466	2.47
74	4.4	3	314	4.66	104	1.4	1.8	466	2.47
75	4.4	3	314	4.66	105	1.4	1.8	466	2.47
76	4.4	3	314	4.66	106	75	25	1000	9.54
77	4.4	3	314	4.66	107	75	25	1000	9.54
78	4.4	3	1320	4.66	108	75	25	1000	9.54
79	4.4	3	1320	4.66	109	75	25	1000	9.54
80	4.4	3	165	4.66	110	75	25	1000	9.54
81	4.4	3	165	4.66	111	75	25	3000	9.54
82	4.4	3	660	4.66	112	75	25	1500	9.54
83	4.4	3	660	4.66	113	75	25	750	9.54
84	4.4	3	264	4.66	114	75	25	600	9.54
85	4.4	3	264	4.66	115	75	25	360	9.54
86	3.75	2.1	300	5.61	116	75	25	3000	9.54
87	10	3.3	300	9.54	117	75	25	1500	9.54
88	10	5.6	692	5.61	118	75	25	750	9.54
89	3.75	1.2	692	9.54	119	75	25	600	9.54
90	2	1.2	160	5.08	120	75	25	360	9.54

Modalitatea anterioară de caracterizare a condițiilor de iradiere nu este singura posibilă. În Capitolul 3, se vor analiza și efectul altor mărimi care caracterizează condițiile de iradiere asupra tăieturilor realizate.

## 2.7. Metode de analiză și evaluare a tăieturilor

Tăieturile obținute au fost analizate prin măsurarea lățimii tăieturii, fotografiere suprafeței tăieturilor, analiza rugozității suprafeței tăieturii, măsurarea durității în zona tăieturii. Măsurătorile au fost realizate folosind sistemul tehnic din figura 2.9.



Figura 2.10. – Sistemul tehnic pentru examinarea metalografică și determinarea durității

Sistemul tehnic utilizat în cadrul experimentărilor a inclus:

- microscopul optic de laborator cu scară gradată și posibilitate de citire cu precizie 0,01 mm;
- microscopul optic de laborator cu cameră foto digitală atașată;
- aparatul pentru determinarea durității;
- sistemul de calcul și interconectare.

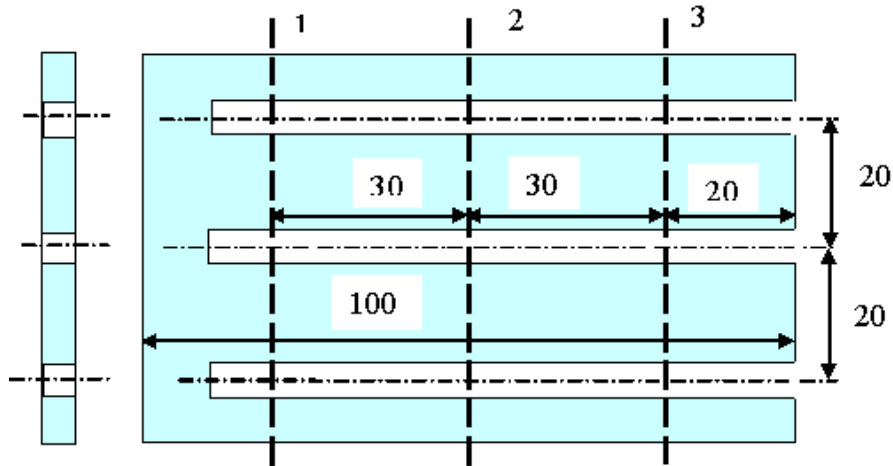


Figura 2.10. – Schema de principiu a tăieturilor realizate

Măsurarea lățimii tăieturii la partea superioară respectiv partea inferioară a piesei au fost realizate în trei puncte ale tăieturii, aceleași pentru toate tăieturile la 20 mm, 50 mm și 80 mm de la începerea tăieturii. Toate aceste măsurători s-au realizat în partea în care procesul de tăiere a fost stabil. Măsurătorile realizate sunt prezentate în tabelul din Anexă împreună cu dispersia între măsurători. S-a utilizat achiziția și prelucrarea primară a datelor experimentale de către sistemul automat.

Tablele care au conținut tăieturile au fost tăiate la 20 mm de la începerea tăieturii. Prin aceasta s-a observat partea interioară a tăieturii. Suprafețele tăieturii au fost fotografiate pentru a analiza neregularitățile micrometrice care apar la suprafața tăieturii. Acestea au fost fotografiate. S-au analizat tipul, perioada și forma neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii. Pentru unele tăieturi selecționate s-a măsurat rugozitatea suprafeței tăieturii.

Pentru unele care au prezentat stabilitate în timpul procesului și au fost înguste s-a realizat o prelucrare metalografică pe secțiunea tăieturii la 20 mm. Pentru acestea s-a realizat fotografierea structurii materialului și măsurarea durității prin încercarea Vickers HV1. Rezultatele măsurătorilor realizate sunt prezentate în Anexa 1.

## 2.8. Metode de modelare experimentală

Cercetarea experimentală în procesele de prelucrare a materialelor metalice presupune desfășurarea proceselor în condiții controlate având obiective urmărite bine stabilite. Se urmărește ca rezultatele obținute să fie reproductibile și generalizabile. Cercetarea experimentală se deosebește fundamental de cunoașterea prin experiență unde rezultatele obținute apar întâmplător și sunt valabile numai în situația în care au fost obținute. Definirea problemelor în cercetarea experimentală este legată de structura și funcționarea sistemelor tehnologice.

Elementele care intervin în modelare experimentală sunt următoarele [Nichici, 1996]:

- sistemul cibernetic;
- parametrii de intrare;



- parametrii de ieșire;
- funcțiile obiectiv stabilite.

Sistemele tehnologice sunt sisteme concrete, având o structură constituită, cel puțin în parte, din elemente fizice cu o funcționalitate determinată, prin capacitatea de realizare a unor transformări specifice ale substanței, energiei și informației. Organizarea sistemelor tehnologice este prezentată în figura 2.11.

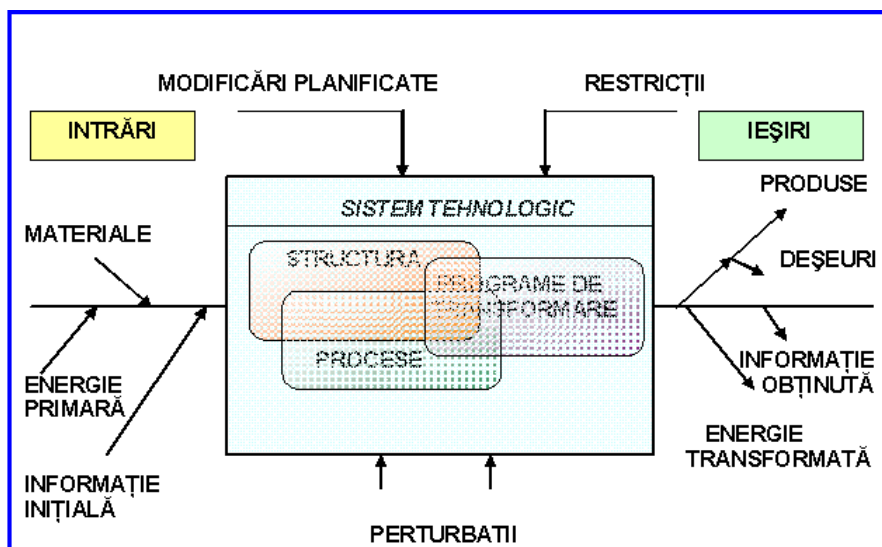


Figura 2.11. – Organizarea sistemelor tehnologice

Intrările  $x$  reprezintă acțiuni (comenzi) exercitate asupra sistemului. Ele coincid cu parametrii care pot fi variații în mod continuu (sau aproape continuu, având o valoare numerică). La nivel teoretic acestea pot fi identificate ca aparținând următoarelor categorii: materiale, informație inițială și energie primară. Ieșirile  $y$  sunt atribute ale sistemului, modificate din cauza variației intrărilor. Ele sunt mărimi măsurate pentru care s-a un interes inițial. La nivel teoretic acestea pot fi clasificate în următoarele categorii: produse (finite) și deșeurile, informație obținută și energie transformată.

Funcționalitatea sistemelor tehnologice este caracterizată de legătura între intrări și ieșiri.

Legătura de cauzalitate ce caracterizează funcționalitatea sistemelor tehnologice se exprimă matematic într-o formă generală, printr-o ecuație de tipul:

$$y = f(x) \quad (2.16.)$$

Acest tip de relație reprezintă funcția de corelație între intrări și ieșiri, care în cercetarea experimentală poartă și denumirile de „model matematic” sau „model empiric”. Funcționarea sistemelor tehnologice este dată de interacțiunea dintre structura acestora, procesele fizice și chimice care au loc și programele de transformare.

Funcționarea sistemelor tehnologice este supusă acțiunii a două tipuri de factorii:

- factorii controlabili;
- factorii necontrolabili sau perturbații.

Factorii controlabili se împart în modificări planificate și restricții impuse. Modificările planificate reprezintă planul de variație al intrărilor iar restricțiile conțin o serie de factori și situații fixate prin reglajele aparaturii care rămân nemodificate în timpul procesului tehnologic.

Cercetarea experimentală asupra unui proces tehnologic constă în definirea intrărilor, numite în acest caz și factori de influență, a ieșirilor numite și funcții obiectiv, a modificărilor controlate sub formă de plane experimentale și a restricțiilor sub formă de condiții experimentale și parametri menținuți constanți. În urma cercetării se obține funcția de legătură între intrări și ieșiri. Aceasta se numește modelare matematică.

Modelul matematic obținut asigură posibilitatea rezolvării corespunzătoare a unor probleme ingineresti fundamentale, cum sunt:

- analiza sistemelor – determinarea structurii și funcționalității unui sistem tehnologic existent;
- sinteza sistemelor – conceperea unui sistem nou, având o anumită structură și funcționalitate;
- conducerea sistemelor – controlul informațional al evoluției sistemelor tehnologice, având ca obiectiv optimizarea funcționalității în raport cu o mulțime dată de criterii și restricții.

Modelarea matematică prezintă următoarele variante:

a) **Modelarea analitică**, reprezintă determinarea modelului matematic pe baza cunoașterii legilor fizice, care guvernează starea și evoluția sistemului. Modelarea analitică pornește de la adoptarea unor ipoteze, logic justificate, prin care se particularizează și se simplifică sistemul analizat. Se scriu în continuare, ecuațiile diferențiale, care descriu fenomenologia proceselor de transformare specifice sistemului, după care se integrează aceste ecuații pentru câteva cazuri particulare idealizate, considerate ca stări limită. Verificarea experimentală a modelelor propuse este importantă, dar nu esențială (o bună concordanță cu datele experimentale nu reprezintă o confirmare decisivă a validității modelului, tot așa cum o slabă concordanță nu înseamnă, în mod obligatoriu, o infirmare a validității modelului). Realizarea experimentelor este independentă de modelarea analitică și poate fi realizată ulterior acesteia. Scopul principal al modelării analitice este acela de a cunoaște influența fenomenelor fizice asupra procesul tehnologic. Rezultatele obținute la modelarea analitică sunt limitate numai de condițiile experimentale date în ipotezele modelului.

b) **Modelarea numerică**, reprezintă un caz particular al modelării analitice în care rezolvarea ecuațiilor diferențiale se realizează folosind calculul numeric. Nu realizează formule, dependența fiind sub formă de valori particulare. Aceasta oferă rezultatele sub forme de diagrame și grafice care au la bază calculul multor valori particulare. Oferă o imagine de ansamblu asupra variației funcției obiectiv care este ușor de interpretat.

c) **Modelarea experimentală (empirică)**, reprezintă determinarea modelului prin prelucrare matematică a datelor de intrare-ieșire, obținute prin măsurări. La modelarea empirică, se renunță în mod deliberat la analiza detaliată a fenomenelor care au loc în sistem și a interacțiunii între ele, urmărindu-se exclusiv

stabilirea, pe principiile statisticii matematice și analizei regresionale, a legăturii dintre funcțiile de răspuns (indicatori de performanță) și variabilele independente ale sistemului într-o formă matematică cât mai simplă (cel mai des, polinomială), adaptabilă calculului automat și utilizabilă nemijlocit în aplicații practice. Forma matematică a funcției  $f$  este una asumată independent de procesul tehnologic studiat. Modelarea experimentală se realizează după efectuarea experimentelor. Modelarea experimentală nu este utilă pentru cunoașterea fenomenelor fizice care guvernează procesul tehnologic. Rezultatele obținute prin modelare experimentală sunt limitate nu numai de condițiile experimentale ci și de valorile particulare alese pentru factorii de influență. Acestea definesc domeniul experimental. Analiza statistică a variațiilor funcției obiectiv stabilește gradul de încredere în extinderea modelului pe domeniul experimental. Aceasta compară variațiile datorate factorilor de influență cu cele datorate existenței perturbațiilor care afectează reproductibilitatea experimentului.

O cercetare experimentală eficientă implică folosirea de metode statistice de analiză dimensională și regresională, programe multifactoriale și modele matematice utilizate în determinarea domeniilor optime de funcționare a sistemelor tehnologice.

Pentru a asigura o bună calitate a modelării matematice se recomandă utilizarea atât a modelării analitice cât și a celei experimentale. Acesta poate avea loc separat dacă se asigură ca ipotezele modelului analitic să fie valide pentru condițiile experimentale. De asemenea pot fi folosite împreună îmbinat, astfel: se stabilește pe cale analitică forma funcției  $f$  iar apoi folosind acest tip de funcție se realizează modelarea experimentală.

## 2.9. Concluzii

În Capitolul 2 se prezintă programele de cercetare experimentală realizate. S-a arătat necesitatea unor experimentări pentru tăierea laser asistată de oxigen care să considere un număr relativ mare de parametri care caracterizează aproape complet procesul tăierea laser asistată de oxigen. S-a arătat necesitatea considerării unui domeniu experimental larg pentru fiecare parametru. Principalele probleme abordate în capitol sunt enumerate după cum urmează:

- S-au formulat condiții experimentale generale legate de materialul de prelucrat OL 37 și sistemul tehnologic utilizat MAZAK 1500.
- S-au formulat condiții experimentale particulare legate de parametri variați în experimente. Aceste au fost structurate pe serii experimentale clasice, unde s-a variat un singur parametru și planuri experimentale factoriale unde s-au variat mai mulți parametri în același timp.
- Se prezintă matricea experimentului factorial complet  $2^5$  și utilizarea unui sistem codificat pentru valorile parametrilor care a permis prelucrarea datelor experimentale cu ajutorul programului STATGRAPHICS.
- Se introduc principale mărimi care caracterizează regimul de iradiere pulsant.
- Se prezintă tăieturile realizate și aparatele cu care s-a măsurat lățimea tăieturii rugozitate suprafeței și durezza materialului în zona tăieturii.
- Se prezintă elementele sistemului tehnologic considerat ca sistem cibernetic de tip intrări – ieșiri

Tipul problemelor prezentate în acest capitol este relevant pentru definirea și organizarea unei cercetări experimentale. În cele ce urmează se vor analiza principalele puncte ale cercetării experimentale realizate.

Enunțarea obiectivelor cercetării pornește de la cerințe tehnologice. În cazul de față s-a urmărit variația parametrilor care controlează iradierea și presiunea oxigenului pentru a obține o imagine de ansamblu a procesului de tăiere, care completează datele avute la dispoziție de utilizatorul industrial S.C. „Compa” S.A. Sibiu. Cercetarea experimentală propusă este legată de combinații ale valorilor parametrilor verificate și/ sau prescrise pentru tăierea laser și urmează în general modele de organizare și metode de analiză care au fost utilizate și în alte studii experimentale.

Următoarea etapă în definirea cercetării experimentale o reprezintă selecția parametrilor variați și a mărimilor măsurate (funcții obiectiv). Se remarcă clasificarea parametrilor variați în parametrii care determină condițiile de iradiere (puterea, viteza de tăiere, ciclul și frecvența de pulsare) și parametrii care caracterizează procesul (presiunea oxigenului și distanța dintre diuză și piesă). Această clasificare nu este strictă viteza de tăiere și distanța diuză-piesă pot fi încadrate în ambele categorii. Principala mărime măsurată a constituit-o lățimea tăieturii. Aceasta are un rol important în caracterizarea tăieturii. Lățimea tăieturii la partea superioară, respectiv la partea inferioară a tăieturii a fost măsurată pentru toate tăieturile realizate.

Partea centrală a experimentării o constituie planul experimental. Se prezintă serii experimentale clasice, unde a fost variat un singur parametru, și planuri experimentale factoriale unde au fost modificați cinci parametrii. Experimentarea de tip clasic este prezentă prin mai multe serii experimentale și prin repetare unui întreg set de serii experimentale la variația unui parametru suplimentar (distanța diuză-piesă). Asupra serilor experimentale clasice se remarcă următoarele:

- Se consideră variația pe rând a tuturor parametrilor, se investighează comportarea fiecărui parametru în parte pe întreg domeniul experimental.
- Se consideră mai multe serii experimentale clasice pentru variația unui singur parametru de interes (cu aplicație pentru presiunea oxigenului și viteza de tăiere).
- Repetare unui program experimental introducând variația unui parametru suplimentar (poziția dintre diuză și piesă) cu reducerea numărului de încercări pentru fiecare serie experimentală prin creșterea diferenței între valorile nivelelor.

Planul experimental de tip factorial a avut un număr relativ mare de parametrii 5, fiecare cu două nivele. Acest tip de organizare a experimentelor pune în evidență următoarele aspecte:

- punerea în evidență a efectului interacțiunii între parametrii;
- selecția parametrilor care au o contribuție importantă asupra valorilor funcțiilor obiectiv analizate.

Planul experimental a fost repetat cu reducerea numărului de încercări pentru situația în care s-a modificat un parametru suplimentar (distanța diuză-piesă). Experimentarea de tip factorial cu două nivele va fi asociată cu experimentare de tip clasic. Cele două tipuri de abordări experimentale se completează reciproc. Astfel experimentarea de tip clasic arată variația unui parametru pe domeniul experimental iar cea factorială interacțiunea dintre parametrii.

Organizarea experimentelor pe serii experimentale clasice și planuri experimentale factoriale este însoțită de două probleme teoretice care vin să completeze planul experimental propriu-zis. Astfel introducerea mărimilor care definesc condițiile de iradiere în regim pulsant cuprind aspectul fenomenologic al condițiilor de iradiere într-un mod în care nu poate fi exprimat direct numai prin valorile parametrilor variați. Tipul de experimentare factorială este asociat cu un model al sistemului tehnologic de tip intrări-ieșiri și cu modelare matematică.

Ultimul punct abordat în definirea cercetării experimentale se referă la folosirea unor mijloace moderne de investigare a tăieturilor și de măsurare a lățimii tăieturii. Se remarcă folosirea unei precizii de ordinul micronilor pentru a pune în evidență variații mici ale lățimii tăieturii. Se remarcă că mijloacele tehnice folosite achiziția în format electronic a datelor și unele prelucrări primare ale acestora.

## 3. ELEMENTE DE MODELARE ANALITICĂ ALE PROCESULUI DE DECUPARE CU FASCICUL LASER

### 3.1. Obținerea transformărilor de fază la iradierea cu fascicul laser

Teoria termică este principalul instrument în studiul cantitativ al fenomenelor care au loc la iradierea laser a materialelor metalice. Fasciculul laser alături de fasciculul de electroni constituie surse termice care sunt capabile să dezvolte densități de flux termic mari. La aceste densități de flux termic au loc prelucrările laser cum ar fi tăierea, găurirea, sudarea, prelucrări de suprafață (laser milling). Absorbția radiației laser în material generează apariția unei surse termice care determină încălzirea materialului. Încălzirea este urmată de o transformare de fază sau de descompunerea chimică a acestuia. Încălzirea materialului și schimbarea de fază a acestuia (topire, vaporizare), sunt fenomene fizice care pot fi denumite *fenomene termice*. O altă categorie de fenomene care apar sunt fenomenele mecanice: fisurarea și ruperea materialului în stare solidă, deplasarea topiturii și vaporilor. Aceste fenomene pot fi denumite și *fenomene termo-mecanice* deoarece forța motrice care le generează este reprezentată de un gradient de temperatură. La acestea se adaugă pentru materiale ceramice și polimerice, descompunerea chimică iar la densități mari de flux termic ionizarea materialului. La densitățile de flux termic amintite, toate aceste fenomene apar aproape simultan, o delimitare spațială și temporală a lor fiind foarte dificilă.

Fenomenul termic de încălzire al materialului este primul care are loc și de producerea lui sunt condiționate toate celelalte fenomene termice sau mecanice. Încălzirea poate fi descrisă prin aplicarea ecuației căldurii. Aceasta reprezintă o egalitate între căldura primită de o unitate de volum și căldura cumulată și cedată de aceasta. Rezultatul aplicării ecuației căldurii îl reprezintă obținerea distribuției câmpului de temperatură în material.

#### 3.1.1. Sursa termică produsă de radiația laser în material

Tratarea termică în procesele de iradiere cu laser începe prin considerarea unei surse de căldură generată de fasciculul laser. Nu se consideră fenomenul fizic care a dus la apariția acesteia. Sursa termică este caracterizată prin densitatea de flux termic  $q$  [W/cm<sup>2</sup>], care este exprimată printr-o mărime fizică care mediază căldura (exprimată în J) relativ la timpul în care are loc procesul de transfer și la suprafața pe care se efectuează transferul de căldură. Densitatea de flux termic „ $q$ ” diferă de intensitatea fasciculului laser  $I$  [W/cm<sup>2</sup>] prin coeficientul de absorbție  $A$ . Numai o parte din intensitatea laserului se regăsește în sursa termică.

$$q = AI \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.1.)$$

Ecuația căldurii exprimă variația câmpului de temperatură în spațiu ( $x, y, z$ ) și durata  $t$ . Interacțiunea dintre laser și material conduce formularea a două tipuri de surse termice (fig. 3.1.):

a) **sursa termică la suprafață**, se consideră atunci când fenomenul de absorbție are loc la suprafață fără a exista o propagare a radiației în material, așa cum este cazul metalelor aflate în stare solidă și lichidă. Ecuația diferențială a căldurii este:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T, \left[ \frac{K}{cm^2} \right] \quad (3.2.)$$

Sursa termică este introdusă prin condiția la limită :

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \quad (3.3.)$$

b) **sursa termică volumică**, se caracterizează prin apariția în interiorul volumului de material a unei surse termice, similar cazului în care ar fi o ardere internă. Ea se aplică în studiul iradierii cu laser a materialelor transparente și semitransparente. La ecuația diferențială a căldurii se adaugă un termen suplimentar care caracterizează această sursă.

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \frac{j_q}{k} \left[ \frac{K}{cm^2} \right] \quad (3.4.)$$

unde :

- $j_q$  reprezintă densitatea volumică de flux de căldură [ $W/cm^3$ ]
- $a$  difuzivitatea termică [ $cm^2/s$ ]
- $k$  conductivitatea termică [ $W/(cm \cdot K)$ ]

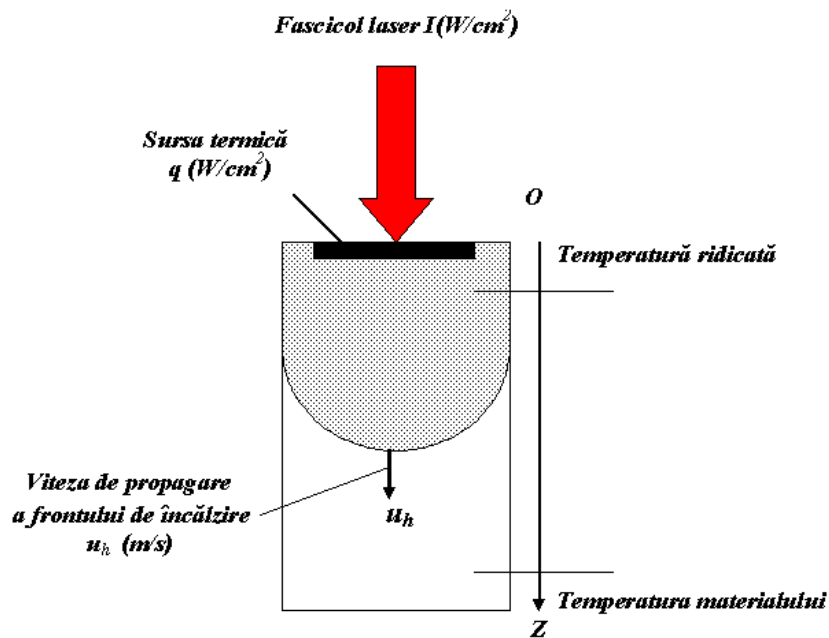


Figura 3.1. – Schema de principiu la încălzirea materialului

Ecuția căldurii se formulează pentru o tratare unidimensională, considerând încălzirea materialului în direcția propagării fascicolului laser (axa OZ). Sursa termică dată de fasciculul laser se formulează prin considerarea densității de flux termic  $q$  la suprafața materialului. Se formulează ecuația căldurii în cazul unui mediu semiinfinite cu o tratare unidimensională, considerând densitatea de flux termic impusă la suprafața materialului. Rezolvarea acestei ecuații conduce la dependența între temperatura de suprafață, densitatea de flux termic și durata de interacțiune dată de relația:

$$T(0,t) \cong \frac{2q}{k} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (3.5.)$$

În aplicarea relației 3.5., trebuie să se țină seama că aceasta reprezintă o diferență de temperatură, creșterea temperaturii la suprafață relativ la temperatura inițială a materialului. Relația 3.5. se poate scrie sub următoarea formă:

$$q = \frac{0,885 T k}{(at)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.6.)$$

Din această relație se deduce expresia pentru durata de interacțiune:

$$t = \frac{0,79 T^2 k^2}{q^2 a} \text{ [s]} \quad (3.7.)$$

Relațiile anterioare reprezintă legătura între temperatura suprafeței materialului densitatea de flux termic și timp. Aceste relații sunt aplicabile la efectuarea de predicții pentru cele trei mărimi atunci când două dintre ele sunt cunoscute, fiind aplicabile până la atingerea temperaturii de topire la suprafață. Folosirea lor astfel încât temperatura de suprafață să depășească temperatura de topire a materialului (sau temperatura de descompunere chimică) reprezintă o abordare eronată. Dacă se utilizează densități de flux termic mari și durate de expunere mari temperaturile la suprafață date de relațiile anterioare sunt uriașe. Lucrul cu aceste temperaturi, ignorând transformările de fază și considerând numai încălzirea este eronat. Se poate efectua o corelație utilă între densitatea de flux termic și timpul de interacțiune în cazul în care la suprafață se obține temperatura de topire. Relația se scrie astfel:

$$q_m = \frac{0,885 T_m k}{(a t_m)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.8.)$$

Prin această ecuație, se realizează legătura între densitatea de flux  $q_m$  termic necesară obținerii temperaturii de topire la suprafață, de timpul de interacțiune  $t_m$ . Obținerea temperaturii de topire la suprafața materialului nu înseamnă și obținerea unei topiri semnificative.

Încălzirea materialului are o evoluție progresivă de la suprafață către interiorul materialului. Pe baza problemei termice anterior prezentate, se obține la o



distanță  $z = \sqrt{at}$ , că temperatura în interiorul materialului scade de zece ori față de temperatura la suprafață. Se consideră că încălzirea materialului la profunzime mai mare ca aceasta nu este semnificativă. Astfel, distanța  $z$  se numește distanța de penetrare termică a căldurii în material. Se consideră viteza medie de propagare a frontului de încălzire în material dată de următoarea relație:

$$u_h = \frac{z}{t} = \sqrt{\frac{a}{t}} \text{ [m/s]} \quad (3.9.)$$

### 3.1.2. Topirea materialului

Topirea materialului este prima transformare de fază care apare în urma încălzirii. Depășirea valorii temperaturii de topire face ca ecuația căldurii să nu mai poată fi aplicată. Problema termică de încălzire poate arăta obținerea temperaturii de topire la suprafața materialului. Realizarea efectivă a topirii necesită alături de temperatura de topire la suprafață și propagarea frontului de topire în material. Topirea este un fenomen fizic izoterm, care este caracterizată prin căldura latentă de topire. Pentru a defini condițiile în care se realizează topirea, este absolut necesară considerarea căldurii latente de topire și căldurii cumulate în material pentru aducerea la temperatura de topire. Din egalitatea căldurii necesare pentru a topii un volum de material cu căldura introdusă la suprafață se caracterizează dezvoltarea fazei topite în material. Propagarea frontului de topire în material este dată de următoarea relație:

$$\rho V L = q S t \Rightarrow \rho S z L = q S t \Rightarrow \rho L \frac{z}{t} = q \Rightarrow q = \rho L u \quad (3.10.)$$

unde:

- $\rho$  - reprezintă densitatea materialului solid;
- $L$  - conținutul de căldură (căldura latentă de topire plus căldura necesară aducerii la temperatura de topire  $L = L_m + c(T_m - T_0)$ );
- $V$  - volumul de material implicat în topire;
- $t$  - durata procesului de topire;
- $z$  - profunzimea în material a frontului de transformare de fază;
- $u$  - viteza de propagare a frontului de topire în interiorul materialului.

Relația obținută arată că viteza de propagare a frontului de topire în interiorul materialului  $u$  este proporțională cu densitatea de flux termic care produce transformarea de fază. Legat de stabilirea acestei formule apare ca factor arbitrar considerarea unei simetrii cilindrice pentru zona în care are loc transformarea de fază (figura 3.2.) Ea a fost stabilită în acord cu [Rykalin, 1978] unde se consideră o proporționalitate între densitatea de flux termic și viteza de propagare a frontului de topire. Indiferent de simetria considerată se menține proporționalitatea între viteza  $v$  și densitatea de flux termic.

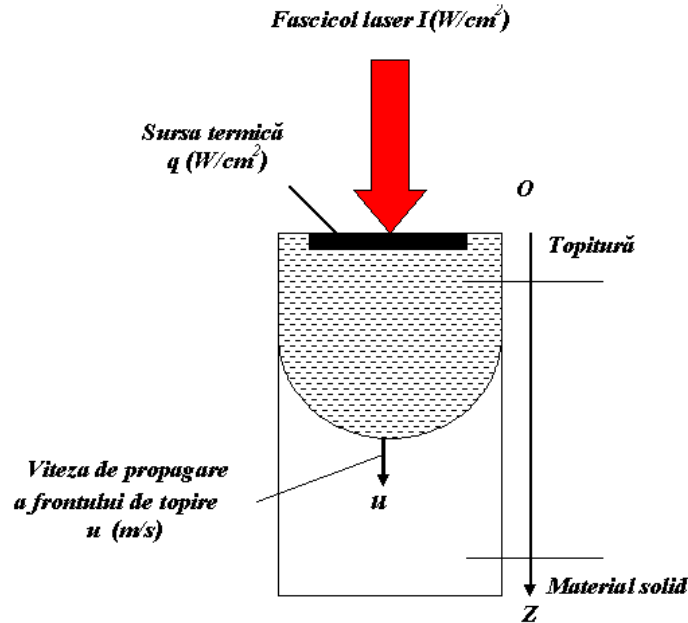


Figura 3.2. – Schema de principiu la topirea materialului

Propagarea frontului de topire în material are loc cu eficiență maximă atunci când viteza propagării frontului de topire este egală cu viteza de propagare a frontului de încălzire. Se obține astfel o relație între densitatea de flux termic, durata de interacțiune și conținutul de căldură la topire.

$$q = \rho L \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (3.11.)$$

Încălzirea materialului urmată de topire datorată fasciculului laser prezintă fenomenul fizic central pe care se bazează tăierea laser a materialelor metalice [Boboescu, 2009, a,b].

### 3.2. Caracterizarea condițiilor de inițiere a procesului de tăiere cu fascicul laser

Inițierea procesului de tăiere se datorează penetrării materialului și inițierea reacției de oxidare. Aceste fenomene sunt date exclusiv de iradierea cu fascicul laser. Pentru ca materialul să fie penetrat este necesar să se asigure topirea acestuia. Ca fenomene termice aceasta înseamnă că materialul să fie adus la temperatura de topire, topit și topitura supraîncălzită pentru a obține curgerea topiturii prin scăderea vâscozității. Pentru aducerea materialului la temperatura de topire și topirea acestuia este necesară o căldură lentă (conținut de căldură)  $L_0 = 2396 J/g$ , [Drăgănescu, 1986].

Ca o condiție minimă asupra iradierii cu fascicul laser se formulează realizarea topirii prin asigurarea căldurii latente anterior amintite. Ca o condiție minimă pentru realizarea tăierii se formulează realizarea topirii datorită fasciculului laser

independent de reacția de oxidare. Deși reacția de oxidare necesită temperaturi mai mici decât temperatura de topire dezvoltarea unui front de ardere, cu accesul oxigenului la oțelul supraîncălzit nu poate avea loc în absența topirii materialului.

Fasciculul laser induce o transformare de fază în material. Aceasta conține mai multe fenomene fizice: aducerea materialului la temperatura de topire, topirea, încălzirea și deplasarea topituri. Toate aceste fenomene sunt caracterizate de o singură mărime sub forma căldurii latente. Această căldură latentă poate fi prelinată pe baza relației 3.11., având în vedere că viteza de propagare a frontului de transformare de fază nu poate să depășească viteza de încălzire.

Se propune o metodă de cercetare care asociază condițiile de iradiere cu fasciculul laser cu o transformare de fază arbitrară desemnată prin căldura latentă. Transformarea de fază considerată desemnează mai multe fenomene fizice care se propagă în masa materialului și care au un caracter izoterm. Căldura latentă obținută se compară cu acelea cunoscute pentru diferite fenomene fizice. Astfel se constată o asociere între fenomenele fizice produse și condițiile de iradiere cu fasciculul laser. Estimarea a luat în considerare absorbția prin coeficientul de absorbție. Durata pulsului s-a considerat ca durata de interacțiune între radiația laser și material. Pe durata pulsului se poate considera încălzirea continuă a materialului. S-a utilizat următoarea relație de calcul obținută pe baza aplicării relației 3.11.:

$$L_{estimat} = \frac{AI}{\rho \sqrt{\frac{a}{t_p}}} \text{ [J/g]} \quad (3.12.)$$

unde constantele fizice utilizate au fost următoarele după [Leong, 2002]:

$$A = 5\% , \rho = 7.87 \text{ g/cm}^3 , a = 0.2 \text{ cm}^2 / \text{s} \quad (3.13.)$$

Rezultatele calculelor asupra căldurii latente estimate sunt prezentate în tabelul 3.1.

Se va analiza corelația dintre căldura latentă estimată și lățimea tăieturii pentru seriile experimentale clasice unde prin variația parametrilor se obține variația căldurii latente estimate. Datele experimentale sunt prezentate în tabelele următoare. Baza de comparație este dată de valorile pentru căldura latentă date în tabelul următor 3.1.

*Tabelul 3.1. – Valori ale căldurii latente asociate cu diferite fenomene fizice pentru fier*

<b>Căldura latentă</b>	<b>Fenomenul fizic asociat</b>
$L_m = 274 \text{ j/g}$	- căldura latentă de topire
$L_0 = 2396 \text{ j/g}$	- pentru a aduce metalul la temperatura de topire și a topii metalul
$L_1 = 2956 \text{ j/g}$	- pentru a aduce topitura la temperatura de vaporizare
$L_v = 7106 \text{ j/g}$	- pentru a evapora metalul topit aflat la temperatura de vaporizare
$L_2 = 10062 \text{ j/g}$	- pentru a aduce metalul solid în stare de vapori

Tabelul 3.2. – Comparație între căldura latentă estimată și lățimea tăieturii pentru seria S2, unde s-a modificat puterea

Încercarea	Durata pulsului [ms]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]	Viteza de încălzire la durata pulsului [cm/s]	Căldura latentă estimată L [J/g]	Lățimea superioară Ls [mm]	Lățimea inferioară Li [mm]	Lățimea medie Lm [mm]
<b>6</b>	1,7	1,12	10,84	<b>656</b>	0,31	0	0,155
<b>7</b>	1,7	1,87	10,84	<b>1095</b>	0,34	0,606	0,473
<b>8</b>	1,7	2,99	10,84	<b>1751</b>	0,393	0,33	0,3615
<b>9</b>	1,7	3,74	10,84	<b>2190</b>	0,423	0,39	0,4065
<b>10</b>	1,7	4,48	10,84	<b>2624</b>	0,476	0,38	0,428

În tabelul 3.2., este prezentată variația căldurii latente estimate în condițiile în care se variază puterea. Se observă că tăierea are loc pentru valori ale căldurii latente estimate mai mici decât cele necesare pentru a aduce materialul la temperatura de topire și a topi materialul. Aceasta posibilitate se datorează evident contribuției reacției de oxidare. Pentru căldura latentă estimată minimă din tabel, apropiată de cea necesară inițierii reacției de oxidare tăierea nu are loc. Se arată astfel că pentru a iniția oxidarea pe un front de tăiere care să penetreze materialul este necesară o valoare mai mare a căldurii latente estimate decât cea de 550 J/g, valoare care din tabel 3.2. apare ca dublată. Pentru ultimele trei încercări din tabel se observă o creștere a lățimii tăieturii cu creșterea căldurii latente estimate.

În tabelul 3.3., este prezentată variația căldurii latente estimate pentru seria S4 dependent de frecvență. Pe domeniul experimental căldura latentă estimată scade cu durata pulsului și este asociată cu scăderea lățimii tăieturii. Sunt prezentate valori ridicate ale căldurii latente estimate. Acestea se situează în domeniul realizării de topitură supraîncălzită. Pentru durate ale pulsului mari efectul fasciculului laser prin căldura latentă estimată depășește pe cel al reacției de oxidare.

Tabel 3.3. – Comparație între căldura latentă estimată și lățimea tăieturii pentru seria S4, unde s-a modificat frecvența

Încercarea	Durata pulsului [ms]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]	Viteza de încălzire la durata pulsului [cm/s]	Căldura latentă estimată L [J/g]	Lățimea superioară Ls [mm]	Lățimea inferioară Li [mm]	Lățimea medie Lm [mm]
16	10,6	5,61	4,34	<b>8205</b>	0,533	0,526	0,5295
17	5,6	5,61	5,97	<b>5963</b>	0,533	0,47	0,5015
18	3,4	5,61	7,66	<b>4647</b>	0,53	0,41	0,47
19	2,1	5,61	9,75	<b>3652</b>	0,51	0,416	0,463
20	1,4	5,61	11,95	<b>2981</b>	0,496	0,356	0,426

În tabelul 3.4., este prezentată variația căldurii latente estimate pentru seria S5 unde s-a variat ciclul. Aici există o variație a căldurii latente estimate prin durata pulsului. Deși valorile pentru căldura latentă estimată sunt moderate acestea sunt asociate situații în care fie tăietura este nepenetrată, fie este lată, fie este îngustă, dar de calitate. Astfel căldura latentă estimată nu reprezintă un parametru care să poată fi asociat direct cu lățimea tăieturii.

Tabel 3.4. – Comparație între căldura latentă estimată și lățimea tăieturii pentru seria S4 , unde s-a modificat ciclul

Încercarea	Durata pulsului [ms]	Intensitatea medie [ $10^6$ W/cm <sup>2</sup> ]	Viteza de încălzire la durată pulsului [cm/s]	Căldura latentă estimată L [J/g]	Lățimea superioară Ls [mm]	Lățimea inferioară Li [mm]	Lățimea medie Lm [mm]
21	0,4	23,85	22,36	<b>6776</b>	0,323	0	0,1615
22	1	9,54	14,14	<b>4285</b>	0,373	1,23	0,8015
23	1,2	7,95	12,9	<b>3912</b>	0,456	0,65	0,553
24	1,4	6,81	11,95	<b>3619</b>	0,44	0,706	0,573
25	1,9	5,02	10,25	<b>3108</b>	0,44	0,316	0,378

Topirea metalului corelată cu căldura latentă de topire nu este un fenomen care să poată fi considerat separat deoarece aducerea materialului la temperatura de topire necesită mult mai multă energie. Astfel, topirea materialului nu poate fi despărțită de aducerea acestuia la temperatura de topire.

Pentru majoritatea condițiilor de iradiere prezentate în cazul folosirii unei durate scurte a pulsului sunt îndeplinite condițiile în care fasciculul laser produce topirea materialului și încălzirea acesteia. În unele cazuri se obțin condițiile pentru a avea vaporizare la suprafața metalului fără a se obține și propagarea frontului de vaporizare în metalul topit. Există și cazuri în care condițiile de iradiere nu sunt favorabile obținerii topirii metalului. Dacă totuși tăierea are loc, aceasta se datorează efectului reacției de oxidare. Folosirea de pulsuri lungi creează condițiile pentru obținerea vaporizării materialului, însă în acest caz durata pulsului este mai lungă decât timpul de interacțiune.

Din analiza valorilor căldurii latente estimate s-au observat următoarele:

- nu există asociere între căldura latentă estimată și lățimea tăieturii. În afara unor cazuri în care valoarea căldurii latente estimate este mică, nu pot fi asociate cu căldura latentă estimată cazurile în care tăierea nu se realizează;
- iradierea cu fascicul laser trebuie să asigure o căldură latentă estimată ridicată, peste 1000 J/s pentru a avea loc tăierea. Căldura latentă estimată prezintă efectul fasciculului laser la suprafața piesei. Reacția de oxidare asigură în toate cazurile un aport energetic suficient topirii materialului. Valorile pentru căldura latentă estimată trebuiesc asociate și cu grosimea materialului;
- cazul ideal pentru realizarea tăierii este acela în care căldura latentă estimată asigură realizarea topirii materialului și supraîncălzirea topiturii;

- un punct de reper important îl reprezintă valoarea căldurii latente estimate care este apropiată de 4600 J/g dată de reacția de oxidare. În aceste cazuri fasciculul laser și reacția de oxidare întrețin același tip de fenomene fizice;
- prezența vaporizării materialului solid nu a fost pusă în evidență decât la valori ale timpului de interacțiune între radiația laser și material de 25 ms. În această situație se obțin tăieturi late.

### 3.3. Modelarea variației lățimii tăieturii cu parametrii de proces

Modelarea analitică în procesele de tăiere laser au ca obiect de studiu următoarele probleme:

- determinarea valorilor parametrilor pentru care procesul de tăiere este realizabil;
- determinarea valorilor vitezei de tăiere care asigură condiții optime pentru realizarea procesului de tăiere;
- determinarea valorilor parametrilor pentru care se obține o anumită calitate a suprafeței tăieturii.

Dintre direcțiile anterior menționate se remarcă cea în care se studiază viteza de tăiere. Viteza de tăiere este un parametru care poate varia relativ mult pe domeniul experimental. Ea poate fi atât parametru critic care determină realizarea tăieturii cât și parametru care determină condițiile optime. Lățimea tăieturii nu face obiectul modelării analitice, însă această mărime poate fi direct legată de realizarea procesului de tăiere și de calitatea suprafeței tăieturilor.

În domeniul tăierii laser modelarea analitică atinge mai multe tipuri de probleme distincte:

- modelarea interacțiunii dintre radiația laser și material, se referă la condițiile de iradiere în care se produce topirea, vaporizarea materialului, condițiile de inițiere și favorizare a reacției de oxidare;
- producerea și menținerea frontului de tăiere, se referă la propagarea frontului de tăiere în material în direcția lucru, cu considerarea efectelor curgerii gazului asistent;
- modelarea termică a îndepărtării materialului sub formă de topitură sau vapori, pentru a realiza o tăietură stabilă de dimensiuni date, se referă la balanța termică care asigură realizarea în condiții stabile a unei tăieturi de dimensiuni date.

Din punct de vedere tehnologic, ultima direcție menționată este cea care aduce cele mai multe informații utile, în special în ceea ce privește valorile vitezei de tăiere.

În cele ce urmează se va prezenta un model care consideră tăierea laser ca un proces stabil. Se va scrie balanța energetică pentru situația în care se obține o tăietură cu lățime medie constantă. Principalele ipoteze ale modelului sunt prezentate după cum urmează:

- se consideră că întreaga îndepărtare de material se realizează în stare topită;
- materialul îndepărtat este desemnat prin masa acestuia „ $m$ ”. Procesul de tăiere al materialului este realizabil cu viteza „ $v$ ” și produce o tăietură desemnată prin aria secțiunii „ $A_s$ ”. Lățimea medie a tăieturii „ $L_m$ ” este asociată cu o secțiune de formă dreptunghiulară. Se consideră pentru materialul îndepărtat densitatea acestuia în stare solidă;

- se neglijează pierderile de căldură prin radiație.

Balanța energetică consideră un echilibru între puterile care intervin în procesul de tăiere. Caracterul uniform al procesului de tăiere permite scrierea balanței energetice la un moment oarecare al procesului. Puterile implicate care iau parte la balanța energetică sunt următoarele:

$P$  - puterea laserului;

$P_{out}$  - puterea degajată în reacția de oxidare;

$P_{in}$  - puterea necesară inițierii reacției de oxidare;

$P_{cond}$  - puterea pierdută prin conducție;

$P_{over}$  - puterea necesară supraîncălzirii topiturii;

$P_u$  - puterea utilă, necesară asigurării topirii materialului.

Balanța energetică are următoarea formă:

$$P + P_{out} - P_{in} - P_{cond} - P_{over} = P_u \text{ [W]} \quad (3.14.)$$

O ipoteză suplimentară se introduce pentru evaluarea acestor puteri, în sensul că pot fi evaluate relativ la aria secțiunii prin tăietură. Introducerea în balanța energetică a termenului  $P_{over}$  desemnează un consum suplimentar dat de supraîncălzire, mișcarea topiturii (ejecția, împrăștierea liberă de topituri), vaporizarea unei părți din material. Aceste fenomene sunt dificil de cuantificat. Prezența lor este certă în procesul de tăiere. Fără supraîncălzirea topiturii aceasta nu ar putea fi evacuată din tăietură. Fenomenul poate fi descris și ca rezultatul unor condiții critice pentru iradiere care sunt necesare pentru realizarea tăierii. Forma ecuației balanței energetice este următoarea:

$$A \cdot P + \rho v A_s L_{out} - \rho v A_s L_{in} - \rho v A_s c_s (T_m - T_0) - \rho v c_l (T_s - T_m) = \rho v L_0 \quad (3.15.)$$

Prin simplificarea relației cu produsul dintre densitate și viteza de tăiere și aria secțiunii se obține:

$$\frac{AP}{\rho v A_s} + L_{out} - L_{in} - c_s (T_m - T_0) - c_l (T_s - T_m) = L_0 \text{ [J/g]} \quad (3.16.)$$

Această relație se transformă sub forma:

$$\frac{AP}{\rho v A_s} = \text{constant [J/g]} \quad (3.17.)$$

Prin explicitarea ariei secțiunii se obține:

$$\frac{AP}{\rho v L_m e} = \text{const ant [J/g]} \quad (3.18.)$$

Pe baza acestei relații se pot face următoarele aprecieri asupra efectului parametrilor, valabile pentru cazul în care procesul de tăiere este stabil:

- pentru aceleași condiții de iradiere lățimea tăieturii și grosimea materialului care poate fi tăiat sunt invers proporționale;
- energia liniară (raportul dintre putere și viteză) și aria secțiunii tăieturii sunt direct proporționale;
- pentru un material de o grosime dată energia liniară și lățimea medie a tăieturii sunt direct proporționale;
- pentru o putere dată viteza de tăiere și aria secțiunii sunt invers proporționale.

Prezentarea de balanțe energetice pentru frontul de tăiere și pentru procesele de tăiere este prezentată în lucrările [Malikov, 2009], [Mas, 2003], [Mas, 2006], [Yibas, 1995], [Schuöcker, 1985] [Schuöcker, 2001] [Suja, 2000], [Sheridan, 2003].

### 3.4. Efecte ale regimului de iradiere pulsant asupra tăieturii

Înțelegerea modului în care se desfășoară iradierea în regim pulsant este un prim pas în înțelegerea efectului iradierii asupra piesei. Iradierea în regim pulsant este caracterizată de următorii parametri:

- energia pe puls;
- durata pulsului;
- frecvența de pulsare;
- viteza de tăiere (viteza de scanare);
- diametrul fascicolului laser (la suprafața piesei sau în pată focală).

Toți acești parametri au un efect cumulat asupra condițiilor în care materialul este iradiat. În cele ce urmează se vor defini și analiza mai multe mărimi. În urma modificării acestor parametri, un punct de pe suprafața materialului, asociat ipotetic cu centrul fascicolului laser este iradiat o anumită durată și primește o anumită energie. Iradierea cu fascicul laser folosind un regim pulsant produce următoarele diferențe de iradiere:

- **Diferența de iradiere în timp.** Puncte diferite de pe suprafața materialului vor fi iradiate la momente diferite.

- **Diferența de iradiere în spațiu.** Punctele pe suprafața piesei pentru care timpul de iradiere este maxim se află la distanțe diferite.

În cele ce urmează se vor analiza mărimi prin care se exprimă durata de interacțiune dintre radiația laser și material. Folosirea unui regim pulsant face ca la modul general, punctele să fie iradiate diferit, dar importantă este valoarea relativă a acestor diferențe. Se pleacă de la considerarea ca model de referință, **modelul iradierii în regim continuu**. Astfel, un punct de pe suprafața materialului va fi iradiat pe durata de interacțiune:

$$t_i = \frac{D}{v} \text{ [s]} \quad (3.19.)$$

unde:

- $D$  este diametrul fascicolului laser;
- $v$  este viteza de tăiere (viteza de scanare).

Timpul  $t_i$  [s] va fi numit **durata de interacțiune**. El reprezintă durata maximă cât poate fi iradiat un punct de pe suprafața materialului. El este



independent de durata pulsului, ciclu și frecvență, mărimi care caracterizează regimul pulsant.

În cadrul duratei de interacțiune iradierea poate fi produsă de mai multe pulsuri laser. Durata pulsului poate cuprinde una sau mai multe perioade de iradiere. Pentru a realiza o legătură între caracteristicile regimului pulsant și durata de interacțiune se introduce **durata de interacțiune relativă** ca fiind produsul dintre durata pulsului și numărul de perioade care intră în durata de interacțiune:

$$t_r = \frac{t_i}{t_c} \cdot t_p \text{ [s]} \quad (3.20.)$$

Așa cum îi spune și numele durata de interacțiune relativă este numai un indicator, nu arată exact durata de interacțiune între radiația laser și material (care este oricum diferită pentru puncte diferite). Introducerea duratei de interacțiune relativă rezolvă următoarele probleme:

- pentru situația în care un punct de pe suprafața materialului este iradiat de mai multe pulsuri consecutive, cumulează timpul de iradiere produs de aceste pulsuri. Pentru puncte diferite pe suprafața piesei timpul de interacțiune real între radiația laser și material este dat de timpul de interacțiune relativ cu o abatere plus sau minus care nu depășește durata pulsului;

- pentru situația în care iradierea provine de la un singur puls se realizează o mediere care transformă situația reală în situația în care ar fi o iradiere continuă, cu un timp de interacțiune proporțional mai mic decât durata pulsului.

Pentru utilizarea timpului de interacțiune relativ între radiația laser și material prima situație descrisă prezintă o importanță mai mare. Efectul mai multor pulsuri consecutive la iradierea materialului aflat deja în stare topită nu poate fi neglijat. Se va vedea din tabelul că există creșteri substanțiale ale timpului relativ de interacțiune față de timpul pulsului.

În cele ce urmează se vor analiza diferențele spațiale de iradiere. Spotul laser pe suprafața piesei este considerat circular și este identificat fie prin centrul spotului fie prin una din extremitățile acestuia. Indiferent de modul cum este identificat spotul laser și dimensiunile acestuia, deplasarea spotului în cursul unei perioade este dată de relația:

$$d = v \cdot t_c = \frac{v}{f} \quad (3.21.)$$

Distanța „d” reprezintă deplasarea spotului (figura 3.3.). Ca referință pentru spot s-a considerat extremitatea acestuia în sensul vitezei de tăiere. Pentru a caracteriza iradierea se introduce ca și criteriu modul în care zona iradiată de un spot laser acoperă zona iradiată de spotul precedent. Această zonă este desemnată de diferența între diametrul spotului și distanța dată de deplasarea în timpul unei perioade. Se consideră raportul dintre această zonă și zona spotului dată de diametrul spotului laser. Se introduce astfel raportul de acoperire al spoturilor „spo”. Acesta este o mărime adimensională.

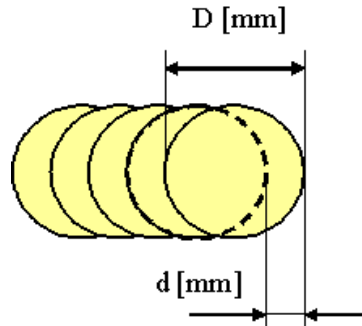


Figura 3.3. – Mărimile care caracterizează suprapunerea spotului fascicolului laser pe suprafața piesei.

$D$  – diametrul spotului;  $d$  – deplasarea spotului

**Raportul  $spo$  (spot overlap)**, reprezintă raportul între diferența dintre diametrul spotului și distanța „ $d$ ” parcursă de acesta pe durata unei perioade și diametrul fascicolului laser. (figura 3.3.)

$$spo = \frac{D-d}{D} \quad (3.22.)$$

Această relație conduce la o legătură între parametrii care caracterizează regimul pulsant:

$$1 - spo = \frac{v}{D \cdot f} \quad (3.23.)$$

Raportul „ $spo$ ” are valori mai mici ca 1. Valoarea 1 înseamnă că nu există deplasare, spoturile cad suprapus. Valoarea 0 înseamnă că spoturile cad unul lângă altul. Valorile negative înseamnă că spoturile cad separat și la distanță pe suprafața piesei. Distanța dintre spoturi este mai mare cu cât raportul „ $spo$ ” este mai mic având valori negative. Relația anterioară are rol în stabilirea practică a vitezei de tăiere.

Există cazuri în care atunci când discuția se rezumă numai la valori pozitive ale raportului „ $spo$ ” acesta să fie exprimat în procente. Valorile raportului „ $spo$ ” pentru condițiile utilizate în experimente sunt prezentate în tabelul.

În tabelul următor se prezintă timpi care caracterizează iradierea. Se observă că există mari diferențe între aceștia. Astfel considerarea timpului de interacțiune între radiația laser și material trebuie adaptată la problema concret formulată, [Boboescu, 2008].

Parametrii care caracterizează iradierea modificați în cadrul programelor experimentale, la care se adaugă diametrul spotului laser, pot fi grupați astfel încât să se utilizeze două mărimi independente:

- puterea de vârf (dependentă de ciclu și puterea medie);
- raportul „ $spo$ ” (dependent , de viteză, frecvență și diametrul spotului).

Valorile pentru puterea de vârf și raportul „ $spo$ ” sunt prezentate în anexa nr. 1. Evaluarea variației lățimii tăieturilor s-a realizat pe baza unei funcții arbitrare „ $J$ ” definită ca produsul dintre puterea de vârf și raportul „ $spo$ ”. Această funcție

prezintă interacțiunea dintre puterea de vârf și raportul „*spo*”. Deși are dimensiunile unei puteri, funcția „*J*” nu are o semnificație fizică:

$$J = P_c \cdot spo \text{ [W]} \quad (3.24.)$$

Pentru seriile experimentale S2-S5 variația parametrilor a condus la variația funcției „*J*”. În graficele următoare se modelează dependența dintre lățimea tăieturii și valorile funcției „*J*”. Ca variabilă s-a considerat lățimea medie a tăieturii dată de măsurătorile realizate. Astfel s-a studiat corelația dintre lățimea tăieturii și o funcție care reprezintă condițiile de iradiere ale materialului. S-au exclus din studiu cazurile în care nu s-a realizat tăietura. Domeniul experimental a fost împărțit în două subdomenii. S-a considerat un domeniu al lățimilor tăieturii mici până la 2,5 ori diametrul fasciculului laser în pata focală și un domeniu al lățimilor tăieturii mari. Primul domeniu, cel al lățimii tăieturii mici este considerat domeniul optim pentru realizarea procesului de tăiere. Modelările s-au realizat folosind funcții de regresie.

Tabel 3.5. – Valori ale duratelor de iradiere (Partea 1)

Nr. crt.	Perioada $t_c$ [ms]	Durata pulsului $t_p$ [ms]	Durata relativă $t_r$ [ms]	Durata de interacțiune $t_i$ [ms]	Nr. crt.	Perioada $t_c$ [ms]	Durata pulsului $t_p$ [ms]	Durata relativă $t_r$ [ms]	Durata de interacțiune $t_i$ [ms]
1	2	1.7	4.08	4.8	31	2	1.7	4.08	4.8
2	2	1.7	4.08	4.8	32	2	1.7	34	40
3	2	1.7	4.08	4.8	33	2	1.7	7.82	9.2
4	2	1.7	4.08	4.8	34	2	1.7	3.4	4
5	2	1.7	4.08	4.8	35	12.5	10.6	4.07	4.8
6	2	1.7	4.08	4.8	36	4	3.4	4.08	4.8
7	2	1.7	4.08	4.8	37	1.6	1.4	4.2	4.8
8	2	1.7	4.08	4.8	38	2	1	2.4	4.8
9	2	1.7	4.08	4.8	39	2	1.4	3.36	4.8
10	2	1.7	4.08	4.8	40	2	1.9	4.56	4.8
11	2	1.7	34	40	41	2.5	2.1	3.36	4
12	2	1.7	12.75	15	42	2.5	2.1	3.36	4
13	2	1.7	7.82	9.2	43	6.6	5.6	3.39	4
14	2	1.7	3.4	4	44	6.6	5.6	3.39	4
15	2	1.7	2.55	3	45	2.5	1.2	1.92	4
16	12.5	10.6	4.07	4.8	46	2.5	1.2	1.92	4
17	6.6	5.6	4.07	4.8	47	6.6	3.3	2	4
18	4	3.4	4.08	4.8	48	6.6	3.3	2	4
19	2.5	2.1	4.03	4.8	49	2.5	2.1	7.72	9.2
20	1.6	1.4	4.2	4.8	50	2.5	2.1	7.72	9.2
21	2	0.4	0.96	4.8	51	6.6	5.6	7.8	9.2
22	2	1	2.4	4.8	52	6.6	5.6	7.8	9.2
23	2	1.2	2.88	4.8	53	2.5	1.2	4.41	9.2
24	2	1.4	3.36	4.8	54	2.5	1.2	4.41	9.2
25	2	1.9	4.56	4.8	55	6.6	3.3	4.6	9.2
26	2	1.7	4.08	4.8	56	6.6	3.3	4.6	9.2
27	2	1.7	4.08	4.8	57	2.5	2.1	3.36	4
28	2	1.7	4.08	4.8	58	2.5	2.1	3.36	4
29	2	1.7	4.08	4.8	59	6.6	5.6	3.39	4
30	2	1.7	4.08	4.8	60	6.6	5.6	3.39	4

Tabel 3.6. – Valori ale timpilor de iradiere (Partea a 2-a)

Nr. crt.	Perioada $t_c$ [ms]	Durata pulsului $t_p$ [ms]	Durata relativă $t_r$ [ms]	Durata de interacțiune $t_i$ [ms]	Nr. crt.	Perioada $t_c$ [ms]	Durata pulsului $t_p$ [ms]	Durata relativă $t_r$ [ms]	Durata de interacțiune $t_i$ [ms]
61	2.5	1.2	1.92	4	91	6.6	5.6	3.39	4
62	2.5	1.2	1.92	4	92	6.6	3.3	4.6	9.2
63	6.6	3.3	2	4	93	2.5	2.1	7.72	9.2
64	6.6	3.3	2	4	94	4	3	4.27	5.7
65	2.5	2.1	7.72	9.2	95	4	3	4.27	5.7
66	2.5	2.1	7.72	9.2	96	2	1.8	11.97	13.3
67	6.6	5.6	7.8	9.2	97	2	1.8	11.97	13.3
68	6.6	5.6	7.8	9.2	98	2	1.8	11.97	13.3
69	2.5	1.2	4.41	9.2	99	2	1.8	11.97	13.3
70	2.5	1.2	4.41	9.2	100	2	1.8	11.97	13.3
71	6.6	3.3	4.6	9.2	101	2	1.8	11.97	13.3
72	6.6	3.3	4.6	9.2	102	2	1.8	11.97	13.3
73	4	3	4.27	5.7	103	2	1.8	11.97	13.3
74	4	3	4.27	5.7	104	2	1.8	11.97	13.3
75	4	3	4.27	5.7	105	2	1.8	11.97	13.3
76	4	3	4.27	5.7	106	50	25	6.65	13.3
77	4	3	4.27	5.7	107	50	25	6.65	13.3
78	4	3	18	24	108	50	25	6.65	13.3
79	4	3	18	24	109	50	25	6.65	13.3
80	4	3	2.25	3	110	50	25	6.65	13.3
81	4	3	2.25	3	111	50	25	20	40
82	4	3	9	12	112	50	25	10	20
83	4	3	9	12	113	50	25	5	10
84	4	3	3.6	4.8	114	50	25	4	8
85	4	3	3.6	4.8	115	50	25	2.4	4.8
86	2.5	2.1	3.36	4	116	50	25	20	40
87	6.6	3.3	2	4	117	50	25	10	20
88	6.6	5.6	7.8	9.2	118	50	25	5	10
89	2.5	1.2	4.41	9.2	119	50	25	4	8
90	2.5	1.2	1.92	4	120	50	25	2.4	4.8

Din figura 3.4., se observă că la începutul domeniului experimental există o creștere puternică a valorilor funcției „J”. La centrul domeniului experimental există două maxime relative. Pe ansamblu, la centrul domeniului experimental valorile sunt relativ apropiate. La sfârșitul domeniului experimental se observă o scădere puternică a valorilor funcției „J”.

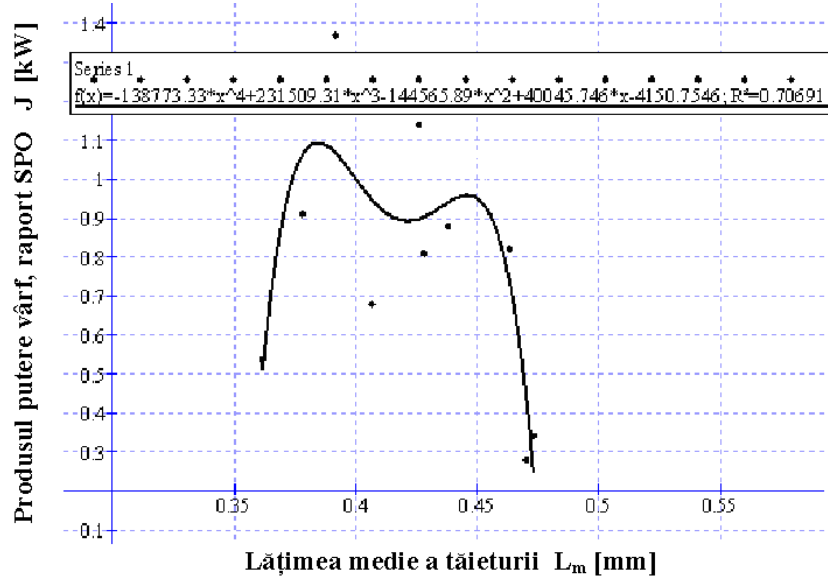


Figura 3.4. – Variația funcției  $J$  cu lățimea medie a tăieturii, pentru lățimi mici ale tăieturii pentru seriile experimentale S2-S5, realizate la  $ddp=1mm$

În figura 3.5., se observă o creștere a valorilor funcției „ $J$ ” cu lățimea tăieturii. Valorile din acest caz sunt mai mari decât cele prezentate în figura anterioară. Se observă un maxim relativ pe domeniul experimental. Se constată că valorile funcției „ $J$ ” cresc cu lățimea tăieturii. Valori ale funcției „ $J$ ” mai mici decât 1kW sunt asociate cu valori mici ale lățimii tăieturii care de obicei sunt asociate cu tăieturi care au suprafețe de bună calitate.

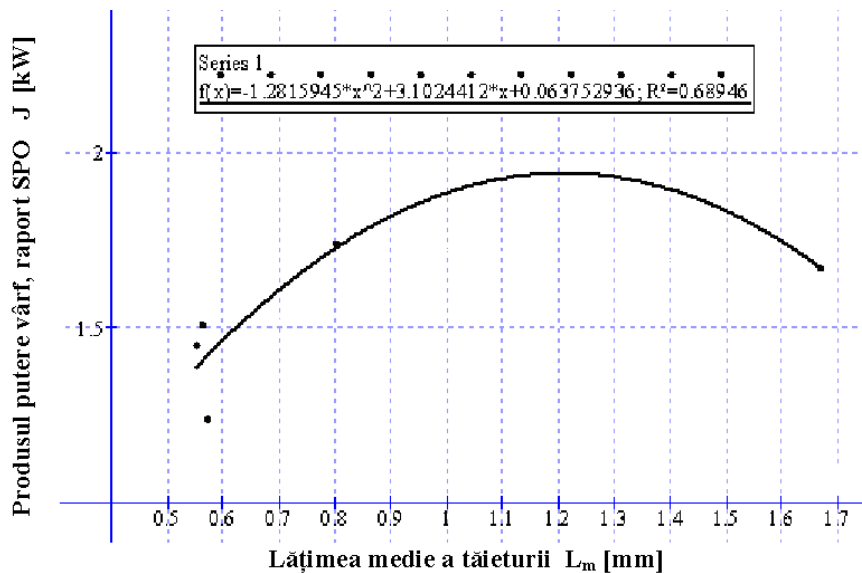


Figura 3.5. – Variația funcției  $J$  cu lățimea medie a tăieturii, pentru lățimi mari ale tăieturii pentru seriile experimentale S2-S5, realizate la  $ddp=1mm$

Același tip de analiză a valorilor funcției „J” a fost aplicat pentru seriile experimentale S7-S10. Pentru această situație s-a considerat modificarea lățimii tăieturii pe întreg domeniul experimental (figura 3.6.).

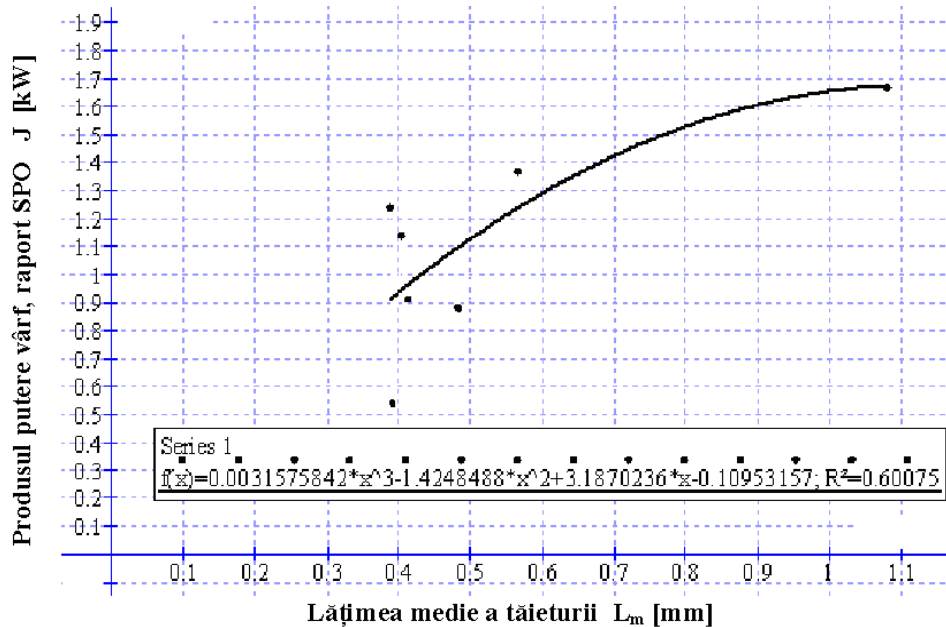


Figura 3.6. – Modificarea funcției J cu lățimea medie a tăieturii pentru seriile experimentale S7-S10, realizate la  $ddp=2mm$

Pe domeniul experimental se observă creșterea valorilor funcției „J” cu lățimea tăieturii. Cele două cazuri analizate arată aceeași tendință de variație și anume creșterea lățimii tăieturii cu valorilor funcției „J”.

### 3.5. Concluzii

În Capitolul 3 se prezintă elemente teoretice ale legate de iradierea cu fascicul laser și de realizarea tăieturii. S-au abordat următoarele probleme:

- Problema interacțiunii dintre radiația laser și material cu aplicație directă pentru formarea de topitură.
- Evaluarea teoretică a efectului condițiilor de iradiere relativ la transformările de fază induse în material.
- Analiza bilanțului energetic pentru procesul de tăiere laser.
- Analiza parametrilor care caracterizează regimul pulsant și corelarea acestora cu lățimea tăieturii.

Selecția acestor probleme teoretice s-a realizat în corelație importanța lor la problemele tehnologice. Astfel iradierea cu fascicul laser are ca principal aspect producerea fenomenelor termice în material. Efectul fascicolului laser a fost considerat similar cu cel al unei surse termice care apare la suprafața piesei, caracterizată prin densitate de flux termic constantă. S-a efectuat distincție între încălzirea progresivă a materialului și fenomenele care pot fi încadrate în categoria transformărilor de fază. Fenomenele fizice topire, vaporizare, mișcarea topiturii și

Încălzirea uniformă în masa materialului pot fi caracterizate în parte sau cumulat printr-o mărime cu dimensiunile unei călduri latente și considerate transformări de fază. Se propune o relație care leagă viteza de propagare a frontului de transformare de fază în material de densitatea de flux termic a sursei date de fasciculul laser la suprafața piesei. Relațiile astfel obținute au valabilitate generală. Acestea sunt folosite pentru a evalua capacitatea fasciculului laser de a induce anumite transformări de fază în material.

Alături de partea inițială a modelării analitice care are în vedere interacțiunea radiației cu materialul a fost abordată și partea finală a modelării și anume bilanțul energetic care face posibilă realizarea procesului de tăiere. Problema studiului efectului gazului asistent la frontul de tăiere, a formării și menținerii frontului de tăiere nu a fost abordată deoarece este dificil ca ea să fie asociată cu obiective tehnologice. Modelarea realizată a arătat aspecte calitative ale variației lățimii tăieturii cu energia liniară și cu viteza de tăiere.

O problemă separată care a fost analizată din punct de vedere teoretic a fost regimul de iradiere pulsant. Iradierea în regim pulsant creează condiții particulare în care materialul este iradiat de mai multe pulsuri succesive sau în care numai anumite părți ale materialului sunt iradiate. Cunoașterea condițiilor de iradiere date de regimul de iradiere pulsant reprezintă un pas important pentru înțelegerea fenomenelor fizice care au loc. S-a arătat că există mai multe modalități de exprimare a timpului de interacțiune între radiația laser și material.

Modelarea analitică este un punct de sprijin important pentru evaluarea rezultatelor experimentale. Interesul pentru modelarea analitică a fost arătată în lucrările [Thawari, 2005], [Tani, 2003], [Prasad, 1998], [Prusa, 1999]. Modelarea analitică a frontului de tăiere este prezentată în lucrările [Kovalev, 2009], [Kovalev, 2005].



## 4. CERCETĂRI PRIVIND ANALIZA ȘI OPTIMIZAREA PROCESULUI DE DECUPARE CU FASCICUL LASER

### 4.1. Analiza seriilor experimentale de tip clasic

Rezultatele experimentale corespunzătoare experimentărilor clasice au fost prezentate sub formă de grafice. S-a folosit metoda de reprezentare folosind funcții de regresie, care descriu tendința procesului, comparabilă cu alte rezultate experimentale, iar în plus, asigură o funcție de corelație care este însoțită de un coeficient de corelație care acordă un nivel de încredere referitor la formula dedusă de program. În afara variației dimensiunilor tăieturilor experimentarea clasică oferă posibilitatea observării unor maxime ale lățimii tăieturii precum și a unor condiții în care procesul de tăiere eșuează.

În figura 4.1., se prezintă schema secțiunii prin tăietură, cu cele trei lățimi ale tăieturii care vor fi analizate în cele ce urmează.

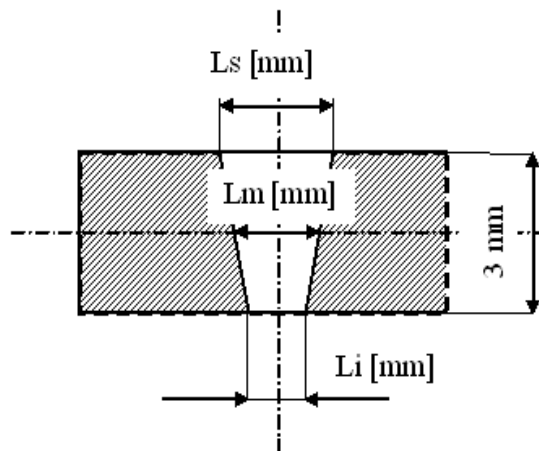


Figura 4.1. – Funcțiile obiectiv măsurate pentru tăieturi

#### 4.1.1. Analiza seriilor clasice cu poziționarea diuzei la 1mm față de suprafața piesei

Interpretarea condițiilor experimentale a arătat modul în care parametrii modifi cați interacționează pentru a defini unele mărimi fizice. Cu toate acestea, înainte de a analiza dependența lățimii tăieturii de modificarea fiecărui parametru în parte, este utilă asocierea fiecărui parametru cu un efect particular, deși această asociere nu reflectă exact condițiile de iradiere. Se consideră ceilalți parametri constanți. Astfel, creșterea puterii asigură creșterea intensității fasciculului laser la suprafața piesei de prelucrat. Creșterea vitezei de tăiere conduce la scăderea

duratei de interacțiune dintre radiația fasciculului laser și material. Puterea și viteza controlează, de fapt, extinderea efectului de iradiere al materialului. Prin creșterea frecvenței se asigură un aspect de continuitate a iradierii. Se mărește, în fapt, timpul de interacțiune dintre radiația fasciculului laser și material. Prin creșterea ciclului se crește direct durata pulsului. Creșterea duratei pulsului înseamnă creșterea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material.

Dintre parametrii enumerați anterior, modificarea puterii determină direct intensitatea fasciculului laser, iar viteza de tăiere, frecvența și ciclul determină durata de interacțiune dintre fasciculul laser și material.

Distanța dintre diuză și piesă „*ddp*”, are efect asupra planului focal în raport cu suprafața piesei. Aceasta are efect atât asupra intensității fasciculului laser la suprafața piesei cât și asupra duratei de interacțiune dintre radiația laser și material.

Efectul parametrilor care controlează iradierea este următorul:

- intensitatea fasciculului laser determină calitativ fenomenele fizice care au loc în material în cazul tăierii cu fascicul laser, realizarea topirii și vaporizării materialului;

- prin creșterea intensității se trece de la obținerea topirii materialului la obținerea vaporizării acestuia;

- durata de interacțiune determină amploarea și extinderea fenomenelor fizice ce au loc în material; o dată cu creșterea duratei de interacțiune, crește cantitatea de material topit, respectiv vaporizat.

Alături de parametrii anterior prezentați, există fenomenul de curgere a gazului la frontul de eroziune. Acest fenomen este controlat de presiunea oxigenului  $pO_2$  și prin distanța dintre diuză și piesă.

În cadrul seriei experimentale S1 (figura. 4.2.), este prezentată dependența lățimii tăieturii obținute, de presiunea oxigenului. Se observă că tăieturile sunt mai late la partea superioară, pe tot domeniul experimental. Ca principiu, dependența poate fi interpretată ca fiind constantă pe domeniul experimental. Funcțiile de regresie arată un maxim la centrul domeniului experimental. Prin aceasta se arată că presiunile ridicate și presiunile scăzute pot avea efecte defavorabile asupra lățimii tăieturii.

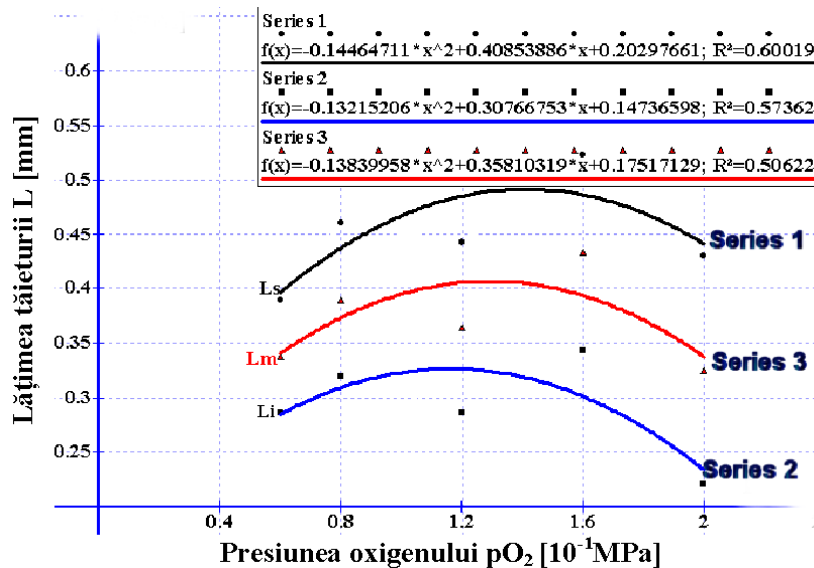


Figura 4.2. – Dependența lățimii tăieturii  $L$  de presiunea oxigenului  $p_{O_2}$ : lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție **de presiunea oxigenului** la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  
 $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm – S1

În cadrul seriei experimentale S2 (figura 4.3.), este prezentată dependența lățimii tăieturii de puterea fasciculului. Ca model general de dependență, lățimea tăieturii crește proporțional cu creșterea puterii fasciculului. Creșterea este liniară și este cel mai bine reprezentată de dependența lățimii tăieturii la partea superioară  $L_s$ . Forma tăieturii variază pe domeniul experimental. Lățimea tăieturii la partea inferioară  $L_i$  are o creștere de tip pătratic, se observă un maxim la valoarea de 800W. Se arată astfel că la creșterea puterii, este favorizată creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară în mod diferit de creșterea lățimii tăieturii la partea superioară. Pentru valorile de 500W, respectiv 1000W ale puterii se obțin tăieturi drepte pentru care lățimea la partea superioară este egală cu lățimea la partea inferioară. La puteri mari și la puteri mici, diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară este considerabilă, pe când, pe zona centrală a domeniului experimental diferențele sunt mici, chiar dacă lățimile tăieturilor sunt mai mari la partea inferioară.

În cadrul seriei experimentale S3 (figura 4.4.), este prezentată dependența lățimii tăieturii de viteza de tăiere. Se observă o scădere de tip exponențial a lățimii tăieturii cu creșterea vitezei de tăiere. Funcțiile de regresie prezentate au un coeficient de corelație ridicat. Pe tot domeniul experimental, tăieturile sunt mai late la partea superioară decât la partea inferioară. Se observă, însă, pe domeniul experimental analizat, diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. Folosirea vitezelor de tăiere mici reprezintă o soluție nefavorabilă deoarece lățimea tăieturii crește mult. Creșterea lățimii tăieturii este asociată și cu producerea unor variații considerabile ale acesteia de-a lungul tăieturii.

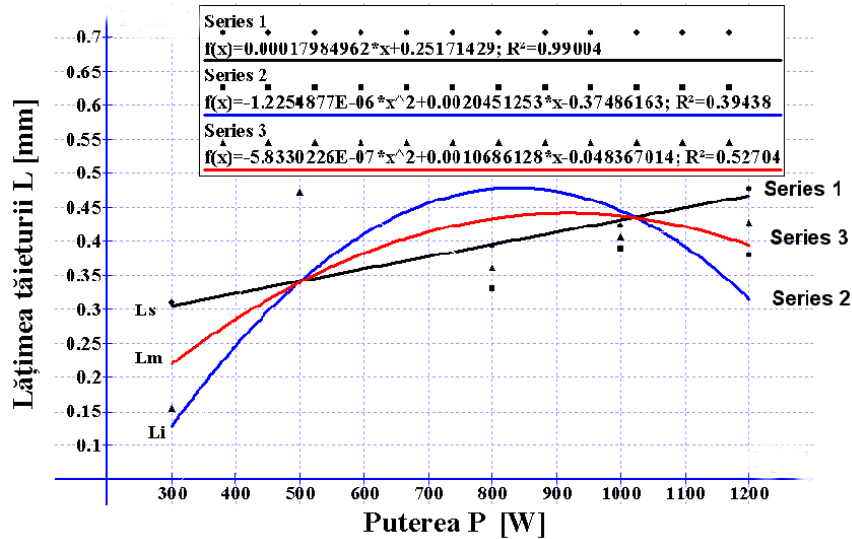


Figura 4.3. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **putere** la  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$   $v = 2500 [mm/min]$   $\eta = 85 \%$   $f = 500 [Hz]$  – S2

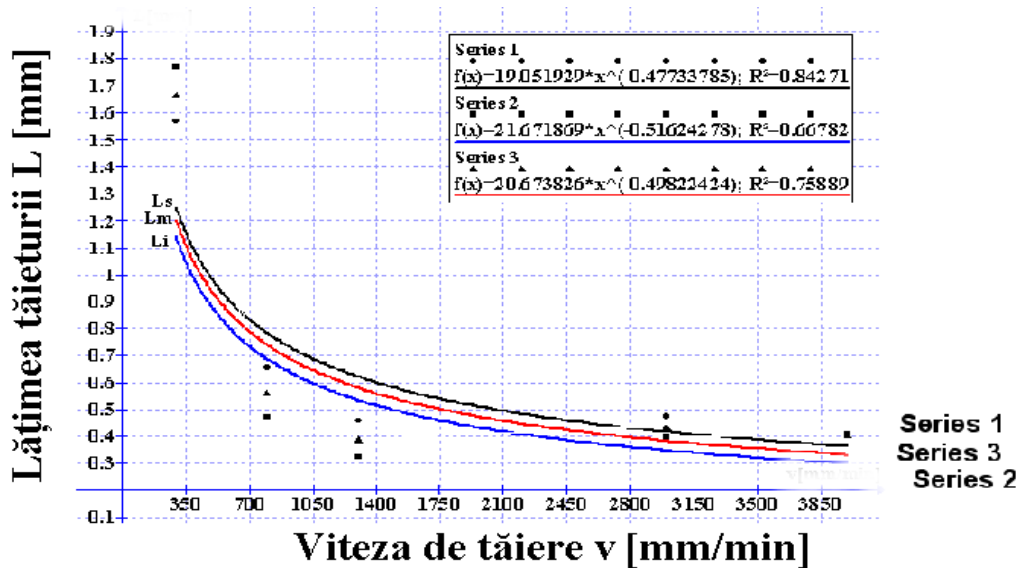


Figura 4.4. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **viteza de tăiere** la  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$   $P = 1500 [W]$   $\eta = 85 \%$   $f = 500 [Hz]$   
 $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$   $ddp = 1 mm$  – S3

În cadrul seriei experimentale S4 (figura 4.5.), dependența lățimii tăieturii de frecvență arată scăderea liniară a lățimii tăieturii cu creșterea frecvenței. Această scădere este asociată cu creșterea calității tăieturii. Utilizarea frecvențelor mici (care produc lățimi ale tăieturilor mai mari), este indicată la tăierea conturilor curbe sau atunci când conturul de decupat are schimbări mari în direcție (contururi cu colțuri). Tăieturile analizate sunt mai late la partea superioară decât la partea inferioară.

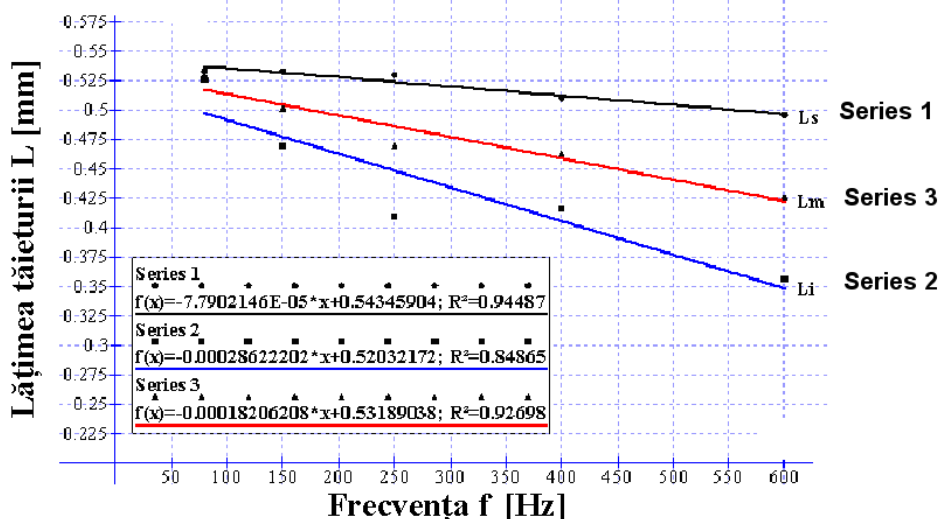


Figura 4.5. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **frecvență** la  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/m]  $\eta = 85$  %  
 $ddp = 1$  mm - S4

Se observă că, odată cu creșterea frecvenței, crește și diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. De asemenea, se observă că lățimea tăieturii la partea inferioară scade mai puternic cu creșterea frecvenței decât lățimea tăieturii la partea inferioară. Se arată astfel că frecvența este un factor care contribuie la deformarea suprafeței tăieturii. Coeficienții de corelație pentru funcțiile de regresie au valori relativ ridicate

În cadrul seriei experimentale S5 (figura 4.6.), a fost analizată dependența lățimii tăieturii de ciclu. Creșterea ciclului înseamnă de fapt, creșterea duratei pulsului. Se observă că tipul de dependență este o variație pătratică. Creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară este mai puternică

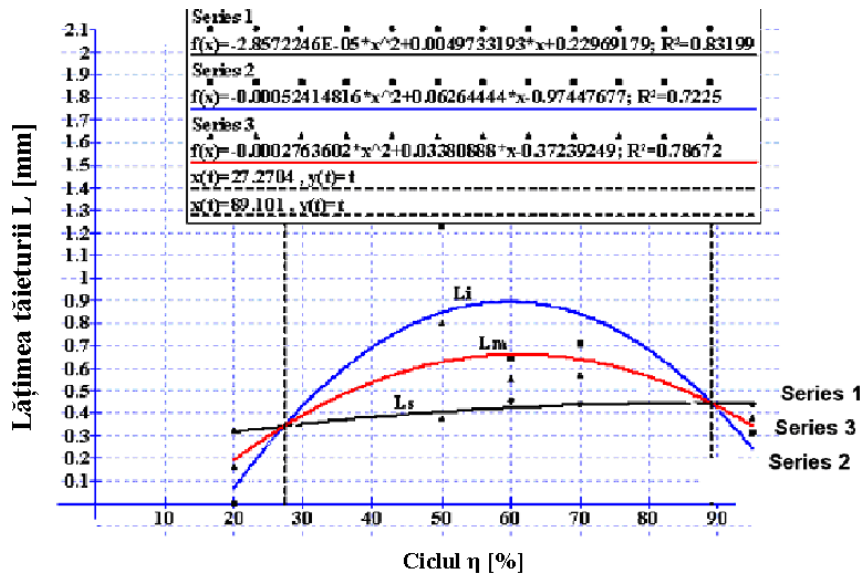


Figura 4.6. – Dependența lății tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de ciclul la  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz] – S5

decât lățimea tăieturii la partea superioară. Pentru lățimea tăieturii la partea superioară, modelul creșterii este aproape liniar. Dependența lății tăieturii de ciclu este similară cu dependența lății tăieturii de putere. Atât puterea cât și durata pulsului contribuie direct la extinderea efectelor iradierii. La valori mici, respectiv mari ale ciclului, se obțin lățimi ale tăieturilor mai mari la partea superioară și diferențe relativ mici între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. În partea centrală a domeniului experimental, pentru lățimea tăieturii la partea inferioară, se obține un maxim. Acesta este însoțit de creșterea diferențelor între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. Valoarea ciclului de 50% se dovedește astfel, nefavorabilă.

Explicația pentru acest comportament constă în faptul că egalitatea dintre durata  $t_p$  a pulsului și durata de închidere a iradierii  $t_{off}$  favorizează preîncălzirea materialului. Astfel, cu creșterea duratei pulsului o cantitate mai mare de material participă la reacția de oxidare. Pentru valoare ciclului de 50%, reacția de oxidare devine instabilă. Reacția de oxidare nu poate avea o evoluție stabilă dacă se obține mult material preîncălzit.

#### 4.1.2. Analiza variației presiunii oxigenului combinată cu variația puterii medii și durata pulsului

În cadrul seriei experimentale S11 (figura 4.7.), este prezentată dependența lății tăieturii de presiunea oxigenului. Se consideră un nivel ridicat al puterii. Deosebirea între condițiile experimentale care apar în această serie experimentală și seria experimentală S1, este reducerea vitezei de tăiere. Astfel crește timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Se observă

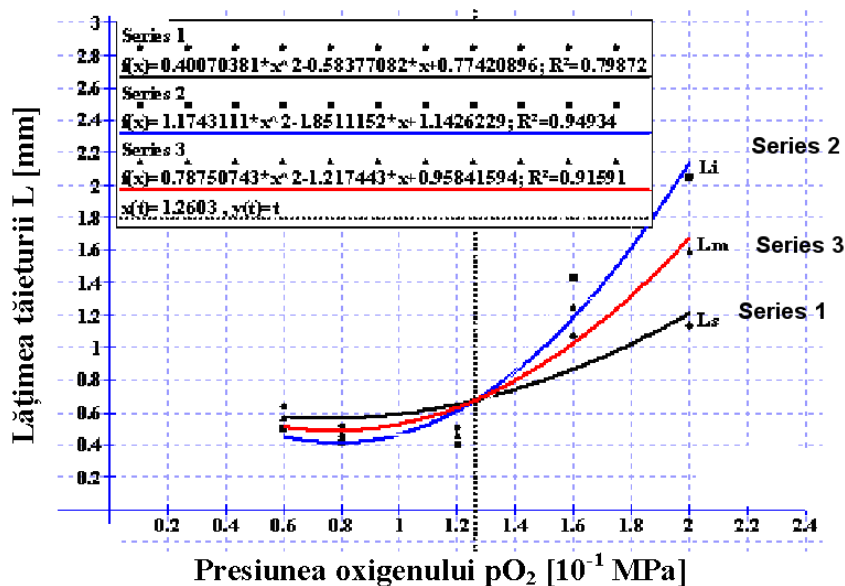


Figura 4.7. - Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de presiunea oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $\eta = 90\%$   $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm - S11 (Iradieră puternică datorată puterii laserului)

mărirea lățimii tăieturii după o relație pătratică. Coeficienții de corelație au valori ridicate, în special pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii. La presiuni reduse ale oxigenului lățimea tăieturii la partea superioară  $L_s$  este mai mare decât lățimea tăieturii la partea inferioară  $L_i$ . De asemenea, diferența dintre cele două lățimi este mică. Se arată astfel, că presiunile reduse favorizează obținerea unor tăieturi cu suprafețe drepte. Pentru presiuni ridicate forma tăieturilor se schimbă, acestea devin mai late la partea inferioară, mărindu-se diferența între lățimea la partea superioară și lățimea la partea inferioară a tăieturii.

Creșterea duratei de interacțiune prin reducerea vitezei de tăiere determină creșterea cantității de material topit (sau preîncălzit în apropierea temperaturii de topire), care participă la reacția de oxidare. Fierul care participă la interacțiune se află în exces. Reacția de oxidare este influențată de creșterea aportului de oxigen. Creșterea lățimii tăieturii se explică în această serie experimentală, prin creșterea efectului reacției de oxidare. Pe de altă parte, durata de interacțiune mai mare și creșterea efectului reacției de oxidare produc topitură în exces. Capacitatea de îndepărtare a topiturii crește odată cu presiunea oxigenului, prin aceasta explicându-se tipul de variație pătratică asociat cu creșterea lățimii tăieturii.

Se remarcă posibilitatea ca prin condițiile experimentale date, pentru presiuni între 0,12...0,13 MPa, să se obțină tăieturi drepte.

În cadrul seriei experimentale S 12 (figura 4.8.), este analizată dependența lățimii tăieturii de presiunea oxigenului. În raport cu seria experimentală S11, puterea a fost redusă la jumătate, ceilalți parametri fiind menținuți constanți. Ca principiu, dependența lățimii tăieturii de presiunea oxigenului este liniară, fiind

aproape constantă. Forma tăieturii se menține constantă pe domeniul experimental, fiind mai lată la partea superioară. Se menține pe domeniul experimental și diferența între lățimea tăieturii la partea superioară cu lățimea la partea inferioară. Figura 4.8. arată că practic, lățimea tăieturii nu variază cu presiunea oxigenului. În principiu, această variație a fost obținută și la seria experimentală S1. Se arată astfel, prin analiza seriilor experimentale S1 și S12, corelarea puterii și a vitezei de tăiere produc situații în care efectul presiunii oxigenului asupra lățimii tăieturii este minim, practic modificarea presiunii nu modifică lățimea tăieturii. Aceste asocieri sunt:  $P=1500\text{W}$ ,  $v=2500\text{ mm/min}$  la seria experimentală S1 și  $P=700\text{W}$ ,  $v=900\text{ mm/min}$  la seria experimentală S12.

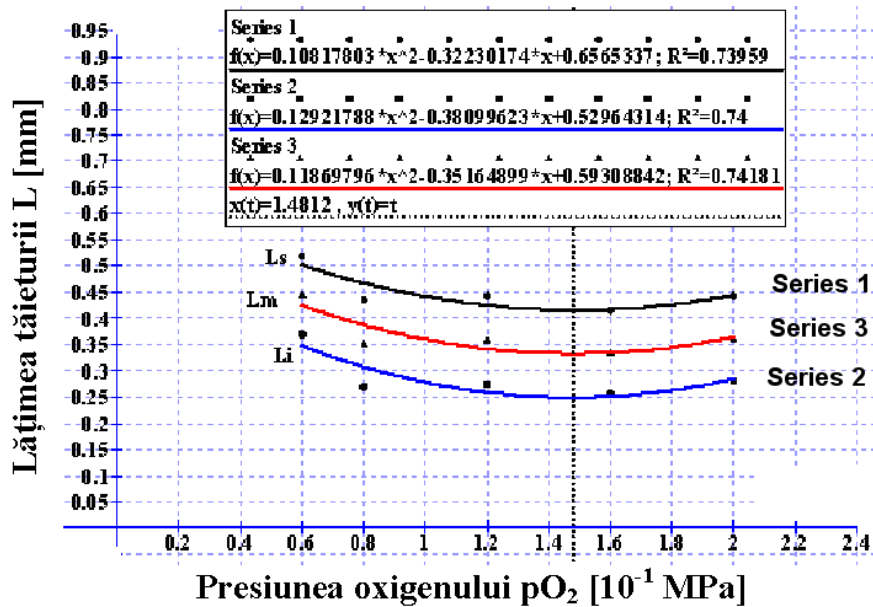


Figura 4.8. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de presiunea oxigenului la  $P = 700 [W]$ ,  $v = 900 [mm/min]$ ,  $\eta = 90 \%$ ,  $f = 500 [Hz]$   
 $ddp = 1\text{ mm} - S12$  (Iradieria slabă datorată puterii laserului)

Pe de altă parte, se observă prin comparația dependenței la seria experimentală S1 cu seria experimentală S12 că în cel de-al doilea caz, cresc valorile absolute ale lățimii tăieturii dar scade diferența dintre lățimea la partea superioară a tăieturii și lățimea la partea inferioară a tăieturii. Acest efect se datorează exclusiv puterii. Figura 4.6., arată și existența unui minim relativ și puțin semnificativ dat de funcțiile de corelație în jurul presiunii de 0,14 MPa. Aceasta poate fi asociată cu condițiile favorabile obținute pentru presiuni de 0,13 MPa la seria experimentală S11.

În cadrul seriei experimentale S13 (figura 4.9.), se prezintă dependența lățimii tăieturii cu presiunea oxigenului. Condițiile experimentale au schimbări importante. Prin variația ciclului și a frecvenței s-a mărit durata pulsului de la 2 ms la 25 ms. Toate tăieturile obținute pentru această serie experimentală sunt mai late la partea inferioară decât lățimea tăieturii la partea superioară. Prin aceasta se arată



că efectul reacției de oxidare a fost puternic. Se confirmă creșterea efectului reacției de oxidare cu creșterea duratei pulsului și asocierea creșterii presiunii cu creșterea îndepărtării de material marcată prin creșterea lățimii tăieturii.

Dependența lățimii tăieturii este modelată, în acest caz, prin funcții pătratice și liniare care au un coeficient de corelație ridicat. Ca tip de dependență, în general există o creștere liniară a lățimii tăieturii cu presiunea oxigenului. Există deosebiri între comportările pentru lățimea la partea superioară a tăieturii și lățimea la partea inferioară a tăieturii. Creșterea lățimii la partea superioară este limitată de creșterea presiunii oxigenului. Există un maxim relativ în apropierea presiunii de 0,16 MPa. Lățimea la partea inferioară a tăieturii are o creștere continuă pe domeniul experimental. Prin dependența lățimii la partea superioară a tăieturii se arată că efectul creșterii presiunii oxigenului asupra îndepărtării materialului este limitată și nu poate crește oricât.

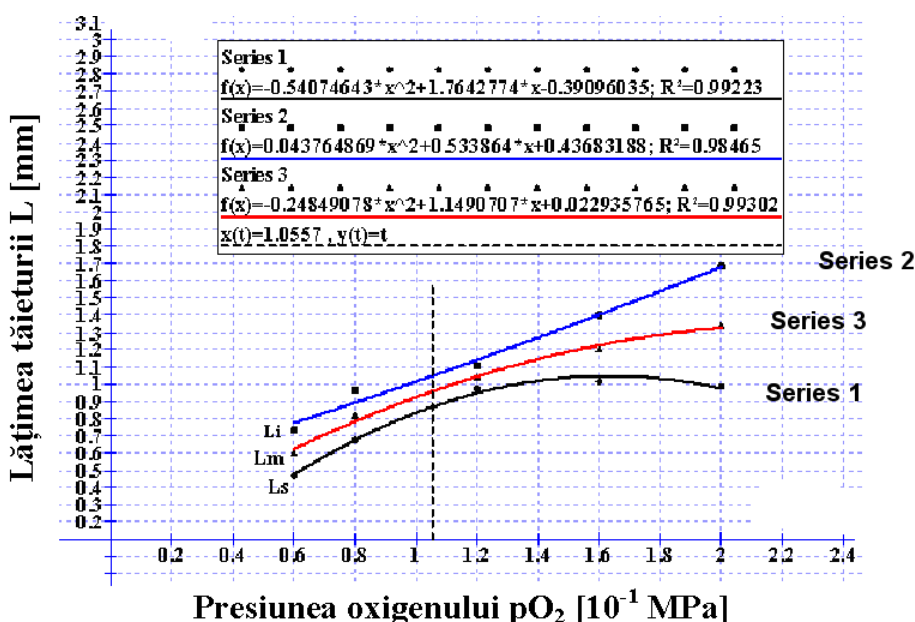


Figura 4.9. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de presiunea oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz]  $\eta = 50$  % - S13

Seria experimentală analizată arată o situație în care reacția de oxidare se dezvoltă în interiorul materialului. Cantitatea mare de material topit face ca lățimea tăieturii la partea superioară să fie întreținută pe baza fenomenului de evaporare. Există diferențe mari între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară, acestea devin mai mari odată cu creșterea presiunii oxigenului. În jurul valorii de 0,1MPa, lățimea tăieturii este minimă, de asemenea și diferența dintre lățimea tăieturii la partea inferioară și lățimea tăieturii la partea superioară. Valorile mari ale lățimii tăieturii pot fi asociate cu reducerea calității suprafețelor tăieturii, existența de instabilități în procesul de tăiere.

### 4.1.3. Analiza variației vitezei de tăiere în condițiile unei iradiieri cu pulsuri lungi la diferite presiuni ale oxigenului

În cadrul seriei experimentale S14 (figura 4.10.), se prezintă dependența lățimii tăieturii cu viteza de tăiere în condițiile folosirii unui regim de iradiere cu pulsuri lungi de 25 ms.

În această situație, tipul obișnuit de dependență în care lățimea tăieturii scade puternic (exponențial), cu creșterea vitezei de tăiere prezentat la seria experimentală S3, nu mai are loc. Lățimea tăieturii crește odată cu viteza de tăiere și se obține un maxim, după care are loc o scădere a lățimii tăieturii până când, la viteze mari procesul de tăiere nu mai are loc.

Această variație este explicată exclusiv pe baza fenomenului de evaporare. La viteze de tăiere scăzute, unde durata de interacțiune este foarte mare (datorită vitezei de tăiere reduse și a duratei pulsului mare), tăietura este menținută pe baza fenomenului de evaporare. Lățimea tăieturii la partea superioară este aproape egală cu lățimea la partea inferioară, pentru primul punct experimental. Evaporarea puternică este defavorabilă pentru reacția de oxidare.

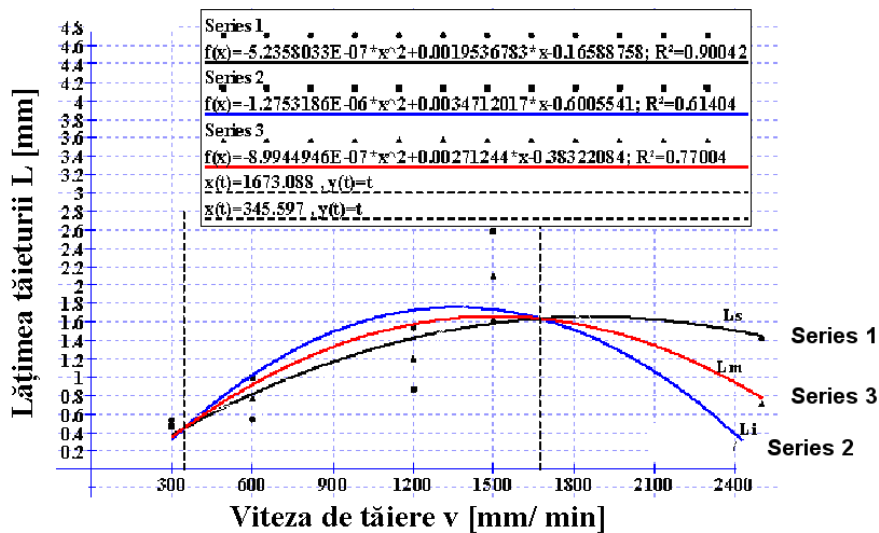


Figura 4.10. – Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de viteza de tăiere la  $P = 1500$  [W]  $\eta = 50$  %  $f = 20$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $ddp = 1$  mm – S14 (pulsuri lungi, presiune redusă a oxigenului)

Creșterea vitezei de tăiere este defavorabilă fenomenului de vaporizare, reacția de oxidare se dezvoltă și lățimea tăieturii crește. Se obțin tăieturi mai late la partea inferioară care au valori absolute ale lățimii tăieturii ridicate și diferențe mari între lățimea la partea inferioară a tăieturii și lățimea la partea superioară. După atingerea valorii maxime, aproximativ 1700 mm/min, lățimea tăieturii scade, scădere care reface tipul cunoscut de dependență. Se restabilește forma tăieturii, mai lată la partea superioară. Funcția de corelație prezentată pentru  $L_s$  are un coeficient de corelație ridicat. Ultima tăietură nepenetrată anulează coeficientul de

corelație pentru  $L_i$  și  $L_m$ . Se observă că odată cu creșterea vitezei de tăiere, la sfârșitul domeniului experimental crește diferența între lățimea la partea superioară a tăieturii și lățimea la partea inferioară a tăieturii.

În cadrul seriei experimentale S15, (figura 4.11.), este prezentată dependența lățimii tăieturii de viteza de tăiere, în aceleași condiții ca la seria experimentală S14 cu durata pulsului de 25 ms. În cadrul acestei serii experimentale, presiunea oxigenului scade, de la 0,08 MPa, la 0,02 MPa. În aceste condiții, pe domeniul experimental se obține o valoare minimă și una maximă a presiunii oxigenului. Presiunea scăzută la viteză de tăiere redusă favorizează oxidarea, chiar dacă în această situație evaporarea este puternică. Există alături de vapori și o cantitate considerabilă de topitură care întreține arderea. La viteză redusă lățimea tăieturii este relativ mare, iar diferența între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei, este mică datorită fenomenului de vaporizare.

Creșterea vitezei de tăiere are un efect de scădere a cantității de topitură obținută și prin urmare defavorizează reacția de oxidare, obținându-se un minim. Pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii se constată o scădere continuă, fără a prezenta un maxim. Oxidarea destul de puternică în condiții de presiune a oxigenului redusă, se deplasează spre suprafața superioară a piesei, astfel crește lățimea la partea superioară a tăieturii și diferența între cele două lățimi la suprafața piesei.

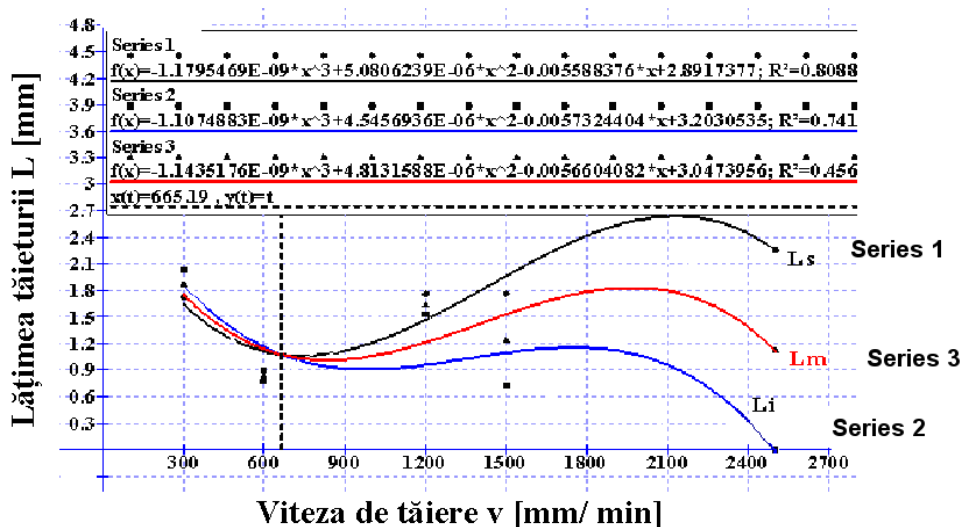


Figura 4.11. - Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de viteza de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 50 \%$   $f = 20 [Hz]$   $pO_2 = 2 \times 10^{-1} [MPa]$   
 $ddp = 1 \text{ mm}$  - S15 (pulsuri lungi, presiune ridicată a oxigenului)

Creșterea lățimii tăieturii la partea superioară  $L_s$  înregistrează un maxim după care are loc o scădere. Se arată că există o evoluție progresivă a creșterii lățimii  $L_s$  și a diferenței dintre  $L_s$  și  $L_i$  către situația în care  $L_i$  devine zero și procesul de tăiere nu mai are loc.

#### 4.1.4. Analiza efectelor produse de modificarea distanței dintre diuză și piesă

Modificarea distanței dintre diuză și piesă de la 1 mm la 2 mm a dus la creșterea lățimii tăieturilor. Interpretarea directă a variației rezultatelor experimentale a fost realizată în lucrarea [Glod, 2009 Constanța]. Creșterea lățimii tăieturilor se datorează creșterii intensității fasciculului laser la suprafața piesei. Aceasta se datorează variației defocalizării (poziția planului focal în raport cu suprafața piesei). Acest parametru nu a fost direct reglat. S-a arătat din datele experimentale că la  $ddp=1\text{mm}$  focalizarea a fost în interiorul piesei iar la  $ddp=2\text{mm}$  a fost către suprafață. În ambele cazuri nu se cunoaște valoarea exactă pentru parametrul de defocalizare. Pe baza punctului de vedere exprimat anterior se vor interpreta modificările lățimii tăieturii pentru cele două cazuri  $ddp=1\text{ mm}$  și  $ddp=2\text{ mm}$ .

În cadrul seriei experimentale S6 (figura 4.12.), se observă că pentru  $ddp=2\text{mm}$  lățimile tăieturii sunt mai mari decât cele pentru  $ddp=1\text{mm}$ . Se păstrează forma tăieturii în cele două cazuri. Pentru  $ddp=1\text{mm}$  lățimea tăieturii crește la presiuni medii. Pentru  $ddp=2\text{mm}$  situația se inversează, presiunile mici și cele mari au un efect de creștere a lățimii tăieturii.

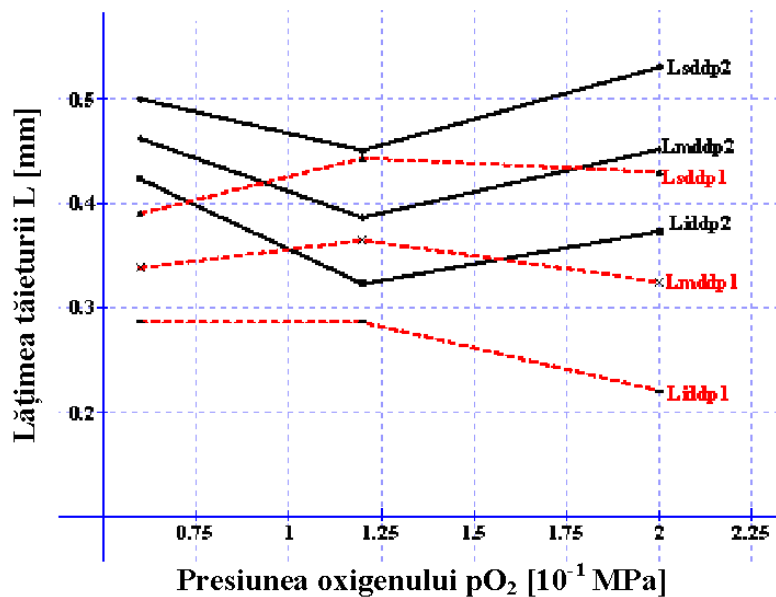


Figura 4.12. - Dependenta lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **Variația presiunii oxigenului** la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85\%$

$f = 500$  [Hz] pentru  $ddp = 2\text{mm}$ , respectiv  $ddp = 1\text{mm}$  - S6

În cadrul seriei experimentale S7, (figura 4.13.), se prezintă variația lățimii tăieturii funcție de puterea fasciculului. Se observă că pentru cele două valori ale  $ddp$  tăieturile își păstrează forma. Puterea acționează direct asupra intensității

fascicolului laser la suprafața piesei. Se observă că pentru cele trei puncte experimentale considerate nivelul acesta este mai ridicat la  $ddp=2$  mm.

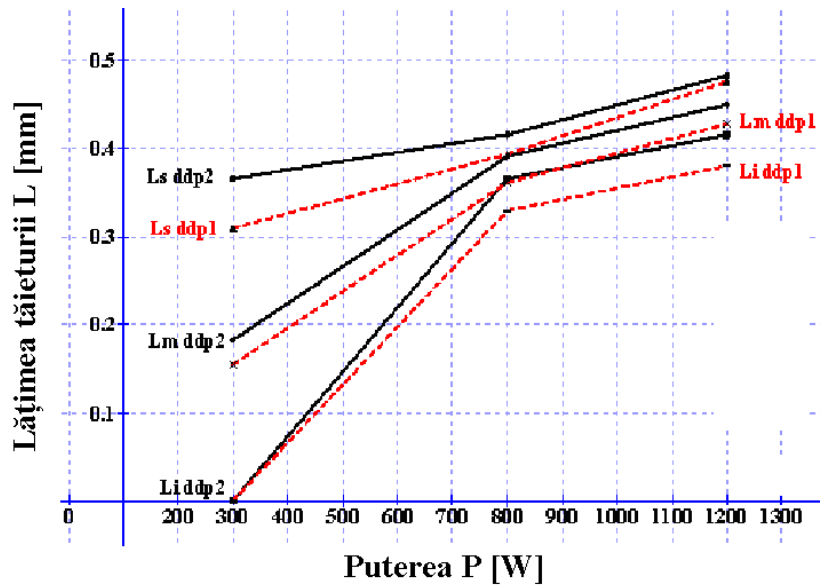


Figura 4.13. Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **variația puterii** la  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa] pentru  $ddp = 2$  mm respectiv  $ddp = 1$  mm - S7

În cadrul seriei experimentale S8 (figura 4.14.), se prezintă variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere. La viteze de tăiere mici lățimea tăieturii este mai mică la  $ddp=2$ mm decât la  $ddp=1$ mm, iar pentru viteze de tăiere mari situația se inversează. Pentru viteze de tăiere mici intensitatea crescută la suprafața piesei favorizează evaporarea ceea ce duce la scăderea lățimii tăieturii. Figurile 4.12. - 4.15., arată direct creșterea nivelului intensității la suprafața piesei pentru  $ddp=2$ mm.

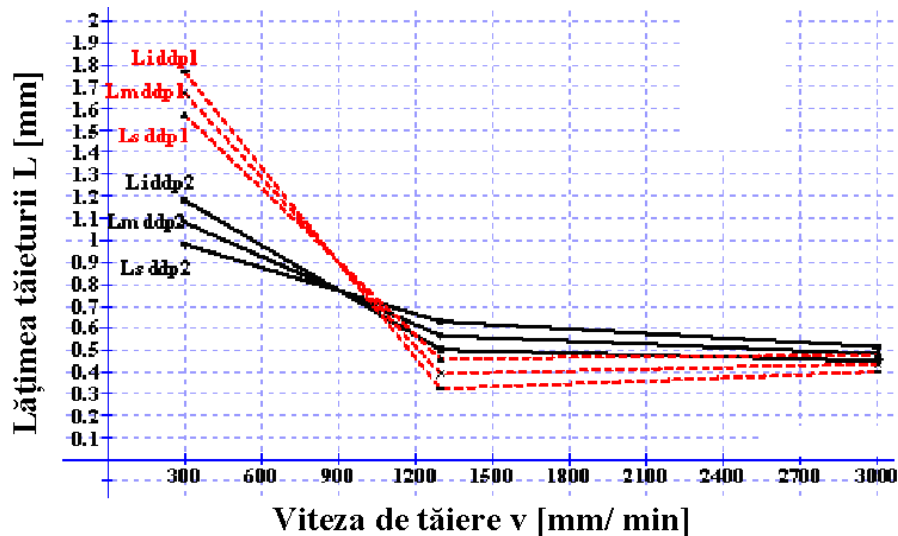


Figura 4.14. – a) Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de variația vitezei de tăiere la  $P = 1500$  [W]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa], respectiv  $ddp = 1$  mm – S8

În cadrul seriei experimentale S9 (figura 4.15.), arată variația lățimii tăieturii cu frecvența. Atât pentru  $ddp=1$ mm cât și pentru  $ddp=2$ mm are loc o scădere a lățimii tăieturii cu creșterea frecvenței. Această scădere a lățimii tăieturii este însoțită de o creștere a calității tăieturii. Forma tăieturii se modifică. Astfel pentru  $ddp=2$ mm, lățimea la partea superioară este mai apropiată ca valoare de lățimea la partea inferioară. Există două valori ale frecvenței la 170 Hz și 450 Hz unde se obțin tăieturi cu suprafețele paralele.

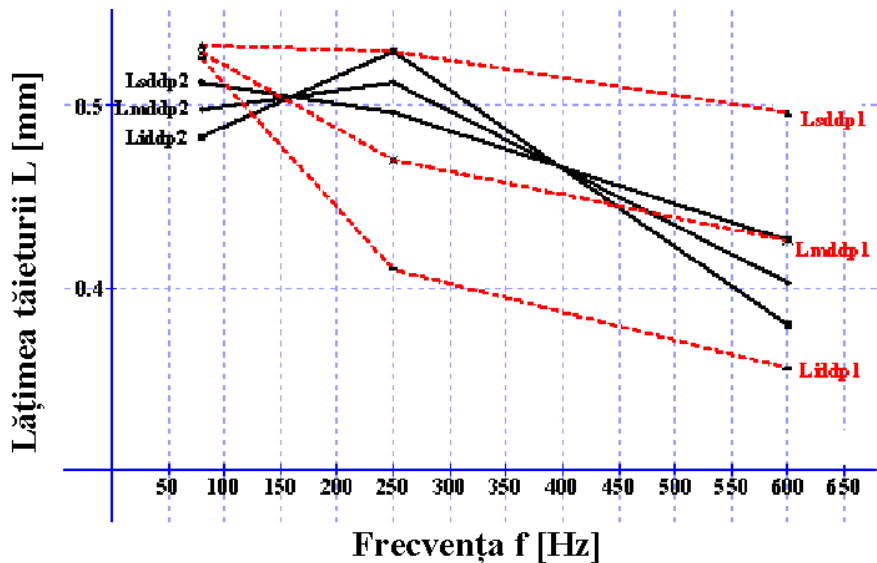


Figura 4.15. - Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **variația frecvenței** la  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85\%$   $f = 500$  [Hz]  $ddp = 2$  mm, respectiv  $ddp = 1$  mm - S9

Pe domeniul experimental la  $ddp=2$ mm, se modifică de două ori forma tăieturii, dată de valorile relative între lățimea la partea superioară, respectiv lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Variația înclinării pereților tăieturilor este mai mică pentru cazul  $ddp=2$ mm. Se arată că intensitatea crescută la suprafața piesei asigură o bună penetrare în material, chiar dacă produce instabilități și variații particulare ale lățimii tăieturii.

Rezultatele seriei experimentale S10 (figura 4.16.), prezintă variația lățimii tăieturii cu ciclul. Pentru ambele situații  $ddp=1$ mm și  $ddp=2$  mm, lățimea tăieturii scade cu ciclul.

Această scădere este însoțită de o creștere a calității suprafeței tăieturii. Pentru ambele situații la valori scăzute ale ciclului se obțin tăieturi mai late la partea inferioară. Acestea sunt asociate cu o calitate scăzută a suprafeței tăieturii. Pentru  $ddp=2$ mm lățimea la partea superioară este mai apropiată de cea la partea inferioară. La  $ddp=2$ mm prin intensitatea crescută la suprafața piesei se atenuază efectul parametrilor critici ciclu și frecvență.

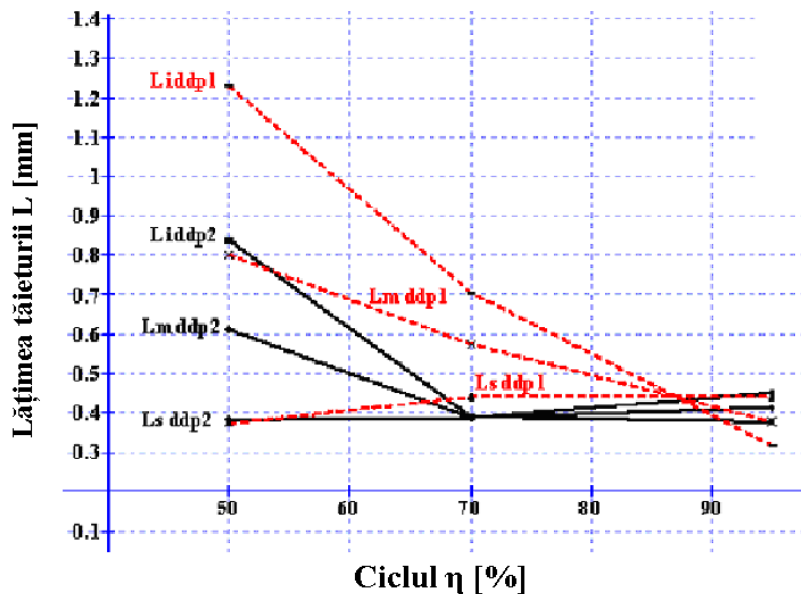


Figura 4.16. - Dependența lățimii tăieturii: lățimea la partea superioară a piesei  $L_s$ , lățimea la partea inferioară a piesei  $L_i$ , lățimea medie  $L_m$  în funcție de **ciclu** la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa] pentru  $ddp = 2$  mm respectiv  $ddp = 1$  mm - S10

#### 4.1.5. Concluzii privind rezultatele pe seriile experimentale clasice

În urma cercetărilor efectuate s-au desprins următoarele concluzii:

- Creșterea **presiunii oxigenului** nu influențează dimensiunile tăieturii în situația în care parametrii care determină iradierea creează condițiile obținerii unei tăieturi înguste. Pentru o lățime a tăieturii mare se observă o creștere liniară a dimensiunilor tăieturii. Aceasta se datorează în principal creșterii dimensiunilor la partea inferioară a tăieturii. Presiunea ridicată a oxigenului are un efect de scădere asupra lățimii tăieturii comparativ cu presiunea scăzută.

- Creșterea **puterii medii** produce o creștere a lățimii tăieturii mult mai clară la partea inferioară, la ieșirea din materialul prelucrat. Cu toate acestea, nu este un factor determinant pentru lățimea tăieturii, dovada fiind că s-au obținut rezultate diferite în condițiile unei puteri medii date  $P = 1500$  [W]. Tendința de a menține constante dimensiunile tăieturii în situația în care puterea crește este asociată cu favorizarea vaporizării în detrimentul încălzirii materialului.

- Creșterea **vitezei de tăiere** conduce la o scădere exponențială a lățimii tăieturii. Această tendință este clară când condițiile de iradiere permit stabilizarea unei tăieturi de dimensiuni mici, corelată cu un timp al pulsului mic. Modificarea regimului de pulsare prin creșterea duratei pulsului conduce la apariția unui maxim puternic marcat prin creșterea dimensiunilor tăieturii care este apoi urmat de eșuarea procesului de tăiere. Se maschează astfel scăderea exponențială.

- Creșterea **frecvenței de pulsare** conduce la o ușoară scădere a lățimii tăieturii.



- Creșterea **ciclului** înseamnă creșterea relativă a duratei pulsului. Se produce un maxim pentru lățimea medie a tăieturii, la aproximativ 50% .

## 4.2. Analiza variației funcțiilor obiectiv pe baza experimentelor de tip factorial

### 4.2.1. Modele matematice pentru planul factorial complet $2^5 E1$

Experimentul  $E1$  realizat după un plan factorial complet a permis studiul tuturor interacțiunilor între factorii de influență. S-au analizat ierarhizarea factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia prin diagramele PARETO STANDARTIZATE și formulele de corelație rezultate între funcțiile obiectiv și factorii de influență.

Interpretare planului experimental factorial a constat în realizarea de modele matematice, ierarhizarea efectelor parametrilor și a interacțiunilor dintre aceștia. Acestea au fost însoțite de studiul variațiilor prin metoda ANOVA. Modelul matematic pentru parametrii exprimații în sistemul de mărimi codificate respectiv mărimi reale sunt prezentate în tabelele 4.1., 4.2., și 4.3., pentru lățimea tăieturii la partea superioară, lățimea tăieturii la partea inferioară și lățimea medie a tăieturii:

Tabel 4.1. – Modelul matematic pentru lățimea tăieturii la partea superioară a piesei pentru planul factorial complet  $2^5 E1$

Formula de corelație în mărimi codificate	
$L_{sup} = 0.4632 - 0.02633.A + 0.00472.B - 0.02649.C - 0.04794.D + 0.0189.E$ $- 0.02672.AB + 0.04442.AC + 0.03986.AD - 0.00346.AE - 0.02143.BC -$ $0.01217.BD + 0.00271.BE + 0.04139.CD - 0.01234.CE - 0.0009.DE +$ $0.03202.ABC + 0.01922.ABD + 0.01059.ABE - 0.04473.ACD - 0.00384.ACE -$ $- 0.00453.ADE + 0.01696.BCD + 0.00859.BCE + 0.0134.BDE - 0.0059.CDE -$ $0.01728.ABCD - 0.02115.ABCE - 0.01846.ABDE + 0.01384.ACDE -$ $0.02271.BCDE + 0.02528.ABCDE$	
	[mm] (1)
Formula de corelație în mărimi reale	
$L_{sup} = 2.07 \cdot 10^{-2} f - 3.81 \cdot 10^{-6} P_v - 6.59 \cdot 10^{-5} P_\eta - 6.74 \cdot 10^{-5} v_\eta - 1.38 \cdot 10^{-5} v f - 1.25 \cdot 10^{-5} P f$ $- 2.69 \cdot 10^{-3} v P_{O_2} - 3.48 \cdot 10^{-3} P P_{O_2} - 2.28 \cdot 10^{-4} \eta f - 6.36 \cdot 10^{-2} \eta P_{O_2} - 1.47 \cdot 10^{-2} f P_{O_2} - 7.422$ $+ 1.7 \cdot 10^{-7} v \eta f + 6.37 \cdot 10^{-11} P v \eta f P_{O_2} - 2.41 \cdot 10^{-8} P v \eta P_{O_2} - 5.11 \cdot 10^{-9} P v f P_{O_2}$ $- 1.07 \cdot 10^{-7} P \eta f P_{O_2} - 9.35 \cdot 10^{-8} v \eta f P_{O_2} - 1.15 \cdot 10^{-10} P v \eta f + 5.1 P_{O_2} + 5.44 \cdot 10^{-3} P$ $+ 5.38 \cdot 10^{-3} v + 9.74 \cdot 10^{-2} \eta + 8.88 \cdot 10^{-6} P f P_{O_2} + 4.3 \cdot 10^{-5} P \eta P_{O_2} + 1.49 \cdot 10^{-7} P \eta f$ $+ 1.91 \cdot 10^{-6} P v P_{O_2} + 9.46 \cdot 10^{-9} P v f + 4.72 \cdot 10^{-8} P v \eta + 3.43 \cdot 10^{-5} v \eta P_{O_2} + 7.46 \cdot 10^{-6} v f P_{O_2}$ $+ 1.63 \cdot 10^{-4} \eta f P_{O_2}$	
	[mm] (2)
Coeficienții de corelație	
$R^2 = 0.99$	$R^2 (adj \text{ for } d.f.) = 0.97$

Modelul matematic prezentat este o formulă polinomială care conține ca variabile valorile parametrilor variați și interacțiunile dintre aceștia reprezentate de produsele lor. Planul experimental factorial complet  $2^5$  permite ca polinomul să aibă un număr maxim de 32 de termeni. Valorile parametrilor și produselor între aceștia care apar în modelul matematic vor fi denumite general efecte. Interacțiunea dintre parametri se reprezintă prin produsul lor. Această reprezentare se justifică prin faptul că acest produs este proporțional cu valoarea fiecărui parametru în parte.

Tabel 4.2. – Modelul matematic pentru lățimea tăieturii la partea inferioara piesei pentru planul factorial complet  $2^5 E1$

Formula de corelație în mărimi codificare
$L_{inf} = 0.37428 + 0.07028.A - 0.02363.B + 0.03876.C - 0.00105.D - 0.03075.E - 0.03101.AB -$ $- 0.09585.AC + 0.04144.AD + 0.06587.AE + 0.13554.BC + 0.00307.BD + 0.05906.BE -$ $- 0.04857.CD - 0.034.CE + 0.06687.DE - 0.04809.ABC + 0.01495.ABD + 0.040687.ABE -$ $- 0.03625.ACD - 0.0465.ACE + 0.0285.ADE - 0.04648.BCD - 0.12006.BCE - 0.01218.BDE -$ $- 0.064.CDE - 0.00305.ABCD - 0.02931.ABCE + 0.04443.ABDE - 0.00325.ACDE + 0.02281.BCDE -$ $- 0.01968.ABCDE$
[mm] (1)
Formula de corelație în mărimi reale
$L_{inf} = 3.18 \cdot 10^{-2} f + 1.17 \cdot 10^{-6} P_v + 4.26 \cdot 10^{-5} P \eta + 11.93 + 5.85 \cdot 10^{-5} v \eta + 1.16 \cdot 10^{-5} v f$ $+ 1.65 \cdot 10^{-5} P f + 2.14 \cdot 10^{-3} v P_{O_2} + 2.05 \cdot 10^{-3} P P_{O_2} + 3.36 \cdot 10^{-4} \eta f + 7.4 \cdot 10^{-2} \eta P_{O_2}$ $+ 1.89 \cdot 10^{-2} f P_{O_2} + -1.28 \cdot 10^{-7} v \eta f - 4.95 \cdot 10^{-11} P v \eta f P_{O_2} - 4.36 \cdot 10^{-9} P v \eta P_{O_2} + 5.31 \cdot 10^{-9} P v f P_{O_2}$ $+ 1 \cdot 10^{-7} P \eta f P_{O_2} + 7.73 \cdot 10^{-8} v \eta f P_{O_2} + 6.49 \cdot 10^{-11} P v \eta f - 6.46 \cdot P_{O_2} - 3.46 \cdot 10^{-3} P$ $- 4.48 \cdot 10^{-2} v - 1.46 \cdot 10^{-1} \eta - 9.94 \cdot 10^{-6} P f P_{O_2} - 2.01 \cdot 10^{-5} P \eta P_{O_2} - 1.77 \cdot 10^{-7} P \eta f$ $- 6.1 \cdot 10^{-7} P v P_{O_2} - 6.75 \cdot 10^{-9} P v f - 1.4 \cdot 10^{-8} P v \eta - 2.39 \cdot 10^{-5} v \eta P_{O_2} - 7.67 \cdot 10^{-6} v f P_{O_2}$ $- 2.07 \cdot 10^{-4} \eta f P_{O_2}$
[mm] (2)

Tabel 4.3. – Modelul matematic pentru lățimea tăieturii la grosimea medie a piesei pentru planul factorial complet  $2^5 E1$

Formula de corelație în mărimi codificare
$L_{med} = 0.41883 + 0.02224.A - 0.00981.B + 0.00644.C - 0.02425.D - 0.00631.E - 0.02923.AB -$ $- 0.02538.AC + 0.04101.AD + 0.03087.AE + 0.05675.BC - 0.00487.BD + 0.03112.BE - 0.00335.CD -$ $- 0.02356.CE + 0.03262.DE - 0.00833.ABC + 0.01675.ABD + 0.02593.ABE - 0.04013.ACD - 0.0255.ACE +$ $+ 0.01168.ADE - 0.05537.BCE + 0.00093.BDE - 0.03525.CDE - 0.01049.ABCD - 0.02493.ABCE +$ $+ 0.01337.ABDE + 0.00493.ACDE + 0.00031.BCDE + 0.00312.ABCDE$
[mm] (1)

Formula de corelație în mărimi reale	
$Lm = -6.33 \cdot 10^{-3} f - 1.33 \cdot 10^{-6} Pv - 1.24 \cdot 10^{-5} P\eta - 4.72 \cdot 10^{-6} v\eta - 1.15 \cdot 10^{-6} v f + 1.75 \cdot 10^{-6} Pf$ $- 2.83 \cdot 10^{-4} v P_{O_2} - 7.39 \cdot 10^{-4} P P_{O_2} + 6.44 \cdot 10^{-5} \eta f + 4.84 \cdot 10^{-3} \eta P_{O_2} + 2.71 \cdot 10^{-3} f P_{O_2} + 2.215$ $+ 2.26 \cdot 10^{-8} v \eta f + 7.83 \cdot 10^{-12} P v \eta f P_{O_2} - 1 \cdot 10^{-8} P v \eta P_{O_2} + 5.93 \cdot 10^{-11} P v f P_{O_2}$ $- 6.35 \cdot 10^{-9} P \eta f P_{O_2} - 8.76 \cdot 10^{-9} v \eta f P_{O_2} - 2.68 \cdot 10^{-11} P v \eta f - 6.546 \cdot 10^{-1} P_{O_2} + 1.03 \cdot 10^{-3} P$ $+ 4.63 \cdot 10^{-4} v - 2.38 \cdot 10^{-1} \eta - 4.03 \cdot 10^{-7} P f P_{O_2} + 1.18 \cdot 10^{-5} P \eta P_{O_2} - 9.04 \cdot 10^{-9} P \eta f$ $+ 6.58 \cdot 10^{-7} P v P_{O_2} + 1.43 \cdot 10^{-9} P v f + 1.68 \cdot 10^{-8} P v \eta + 5.34 \cdot 10^{-6} v \eta P_{O_2} - 7.23 \cdot 10^{-8} v f P_{O_2}$ $- 1.99 \cdot 10^{-5} \eta f P_{O_2}$	
[mm] (2)	
Coeficienții de corelație	
$R^2 = 0.98$	$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.88$

Modelul matematic poate fi folosit direct pentru a calcula valorile funcției obiectiv pe baza valorilor parametrilor modificali. Expresia modelului matematic în sistemul codificat permite analiza contribuției efectelor prin analiza modulului și semnului coeficienților. Această analiză este prezentată într-o formă mai accesibilă sub formă de diagrame PARETO și suprafețe de răspuns. Coeficienții de corelație prezentați sunt asociați cu metoda de analiză a variațiilor ANOVA, aceasta este prezentată în anexa nr. 2.

#### 4.2.2. Analiza diagramelor PARETO pentru planul factorial complet $2^5 E1$

Diagrama PARETO prezintă ierarhia efectelor asupra funcției obiectiv măsurate. Efectele care depășesc linia punctată sunt preliminate de model cu abatere de la medie de până la 0,05 sau un prag de probabilitate care să depășească 95 %. Aceste rezultate sunt date de analiza variațiilor ANOVA și sunt obținute prin aplicarea testului statistic Fisher. Efectele care depășesc linia punctată vor fi considerate semnificative din punct de vedere statistic. Semnul pozitiv al unui efect arată că odată cu creșterea valorii efectului crește și valoarea funcției obiectiv. Semnul negativ arată scăderea valorii funcției obiectiv. Modulul valorii asociate arată contribuția efectului respectiv. Efectele sunt aranjate în ordinea descrescătoare a modulelor.

Pentru fiecare funcție obiectiv analizată se prezintă două diagrame PARETO, una care consideră toate interacțiunile între parametrii, interacțiuni de ordinul cinci, iar a doua variantă în care se exclud toate interacțiunile între parametrii. Cele două situații corespund la două situații extreme de modelare. Prima situație corespunde unui model cu coeficient de corelație ridicat. A doua situație corespunde unui model matematic cu coeficient de corelație scăzut. Se observă că ierarhia parametrilor se menține pentru cele două situații. Astfel are loc o cumulare a efectelor interacțiunilor și exprimarea acestora prin efectele parametrilor. Cele două situații prezentate sunt două cazuri extreme în ceea ce privește considerarea interacțiunilor. Diagramele PARETO prezentate arată că interacțiunile de ordinul patru și cinci între parametrii sunt semnificative. Astfel că excluderea lor din model nu este recomandată.

Parametrii analizei pot fi clasificați după cum urmează. Astfel puterea determină intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei. Frecvența, ciclul și

viteza determină timpul de interacțiune între radiația laser și material. Presiunea oxigenului determină caracteristici ale desfășurării procesului de tăiere fiind independentă de cele două categorii anterior amintite. Analiza diagramelor PARETO va avea în vedere comportarea acestor categorii de parametri. Aspectul calitativ al fenomenelor fizice care au loc depinde de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Aspectul cantitativ al fenomenelor fizice, sau altfel spus extinderea acestora depinde de timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Realizarea procesului de tăiere este condiționată de prezența altor parametri care țin de organizarea procesului de prelucrare cum ar fi în cazul de față, presiunea oxigenului.

Diagramele PARETO prezentate evidențiază un număr mare de efecte. Un parametru va fi apreciat prin efectul său și prin interacțiunile la care participă. Pentru fiecare efect este importantă poziția acestuia în cadrul diagramei PARETO relativ la interacțiunea de ordinul cinci între parametri. Aceasta reprezintă efectul de fond. Numai parametri și interacțiunile între ei care depășesc efectul de fond au semnificație. Diagrama PARETO arată întotdeauna un echilibru între mărimile care cresc valoarea funcției obiectiv și mărimile care descresc valoarea funcției obiectiv. Excluderea interacțiunilor strică acest echilibru.

În figura 4.17., este prezentată diagrama PARETO pentru lățimea tăieturii la partea superioară. Efectul cel mai puternic este cel datorat frecvenței. Acesta este urmat de cel al interacțiunii dintre putere, ciclu și frecvență și apoi la interacțiunea dintre putere și ciclu. Patru contribuții ale frecvenței se regăsesc în primele cinci efecte. Viteza de tăiere are o contribuție importantă prin interacțiunea cu puterea și cu ciclul chiar dacă efectul propriu este redus. Presiunea oxigenului și interacțiunile la care participă au un efect mai mic decât efectul de fond dat de interacțiunea celor cinci parametri. Se arată astfel că condițiile de iradiere cu fascicul laser au efect mai mare la partea superioară a tăieturii decât reacția de oxidare. Semnificația statistică a fost obținută pentru majoritatea efectelor analizate. Sub pragul de semnificație statistică se află numai efectul vitezei de tăiere și interacțiuni de ordinul doi și trei ale presiunii oxigenului. Interacțiunea dintre frecvență și presiunea oxigenului este efectul cel mai redus. Creșterea respectiv lățimii tăieturii la suprafața piesei cu parametri nu poate fi pusă direct pusă în evidență deoarece fiecare parametru contribuie atât la efecte crescătoare cât și la efecte descrescătoare.

În figura 4.18., se prezintă diagrama PARETO pentru lățimea tăieturii la partea superioară cu excluderea interacțiunilor între parametri. Se observă că semnificația statistică se obține numai pentru frecvență. Frecvența și ciclul reprezintă primele două efecte. Acestea caracterizează static iradierea cu fascicul laser, ignorând interacțiunea dintre fasciculul laser și piesă. Viteza arată tocmai această interacțiune are un efect redus. Se observă că există astfel o comportare diferită a parametrilor care controlează timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Durata pulsului exprimat de frecvență și ciclu alături de putere scad lățimea tăieturii la suprafața piesei. Aceasta comportare exprimată prin valorile negative ale celor trei efecte arată că la suprafața piesei are loc vaporizarea materialului.

Se arată că parametri care controlează iradierea favorizează vaporizarea materialului, care scade lățimea tăieturii. Creșterea vitezei de tăiere reduce vaporizarea prin reducerea timpului de interacțiune dintre radiația laser și material. Creșterea presiunii oxigenului crește contribuția reacției de oxidare care are ca rezultat principal topirea materialului și lățimea tăieturii crește. Se arată de

asemenea că efectul regimului de iradiere este oarecum independent de cel al presiunii oxigenului. Rolul principal revine regimului de iradiere.

În figura 4.19., este prezentată diagrama PARETO pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a tăieturii cu considerarea tuturor interacțiunilor între parametrii. Efectul cel mai puternic îl are interacțiunea dintre viteza de tăiere și ciclu. Este urmată de interacțiunea dintre viteza de tăiere ciclul și presiunea oxigenului, apoi de două efecte ale puterii. Prezența ca prim efect a vitezei de tăiere și a ciclului arată contribuția majoră a timpului de interacțiune dintre radiația laser și material. Ca parametru important în stabilirea timpului de interacțiune între radiație și material viteza de tăiere înlocuiește frecvența în comparație cu lățimea tăieturii la partea superioară a piesei. Frecvența are ultimul efect însă interacțiuni la care participă frecvența sunt ridicate, aproape de nivelul puterii.

Pe locul doi apare celălalt parametru care controlează iradierea și anume puterea. Presiunea oxigenului are un efect ridicat prin interacțiunile la care participă și interferă cu cel al parametrilor care controlează iradierea. Interacțiunea dintre cei cinci parametri are un efect mult mai redus decât pentru lățimea tăieturii la partea superioară. Astfel mai multe efecte devin semnificative.

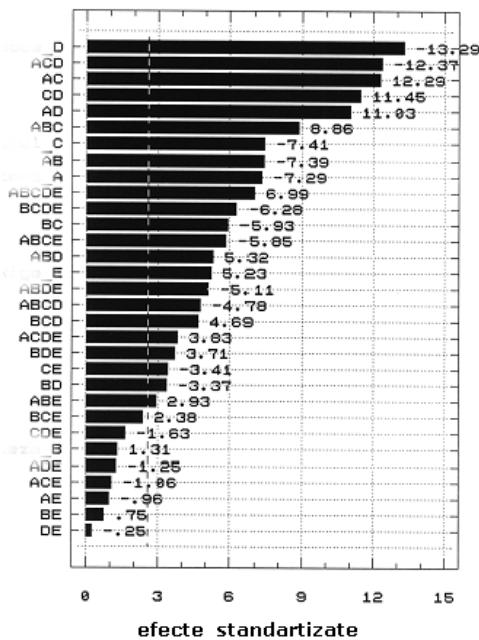


Figura 4.17. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, cu considerarea interacțiunilor

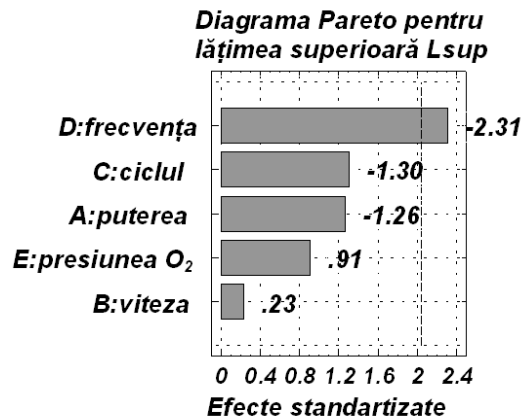


Figura 4.18. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, fără considerarea interacțiunilor

Interacțiunea celor cinci parametri depășește numai efectul frecvenței. Semnificația statistică este atinsă pentru un număr mai mic de efecte decât în cazul lățimii tăieturii la partea superioară. Se remarcă faptul că efectele a trei parametri: presiunea oxigenului, viteza și frecvența nu pot fi prezise de model cu semnificație statistică. Se observă că parametrii care controlează iradierea sunt în multe cazuri asociați cu creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei.

Astfel pentru partea inferioară a piesei creșterea nivelului de iradiere este asociată cu topirea și nu cu vaporizarea materialului cum se întâmplă pentru partea superioară a piesei. Presiunea oxigenului scade lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Acest lucru se datorează creșterii îndepărtării de material.

În figura 4.20., se prezintă diagrama PARETO pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii în situația în care se exclud toate interacțiunile.

Se observă că se pierde semnificația statistică pentru toți cei cinci parametrii discutați. Primul efect este cel al puterii. Puterea prin intensitatea fascicului laser controlează aspectul calitativ al fenomenelor fizice care au loc. În situația de față se face referire obținerea topiturii. Obținerea topiturii la partea inferioară a piesei este mai importantă decât extinderea acesteia prin parametrii care controlează timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Efectul presiunii oxigenului se află pe același nivel cu cel dat de timpul de interacțiune între radiația laser și material. Se confirmă faptul că viteza are un efect mai ridicat decât cel al frecvenței.

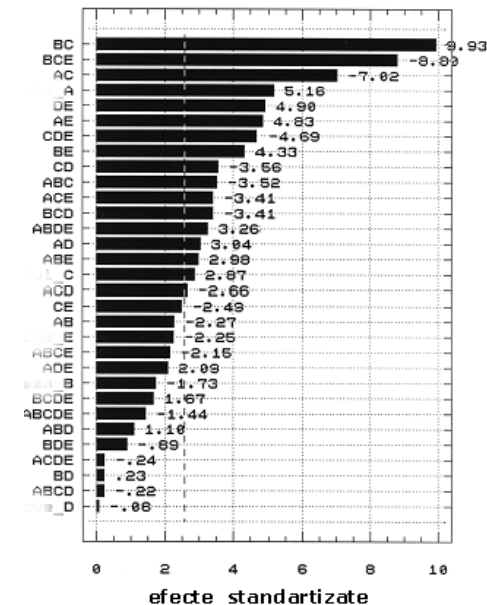


Figura 4.19. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, cu considerarea interacțiunilor

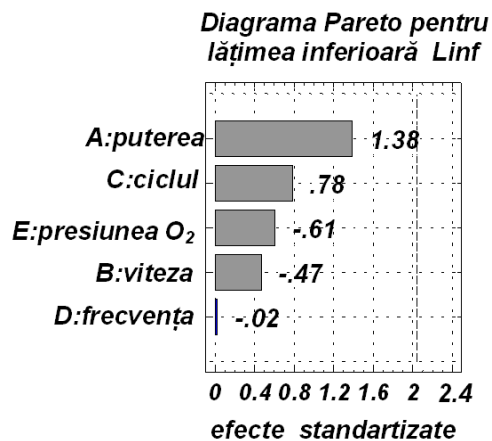


Figura 4.20. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, fără considerarea interacțiunilor

În figura 4.21., este prezentată diagrama PARETO pentru lățimea medie în cazul în care se iau în considerare toate interacțiunile între parametrii. Lățimea medie fiind calculată ca media lățimii la partea superioară și celei la partea inferioară va prezenta o combinație între efecte care se întâlnesc pentru lățimea la partea superioară, respectiv pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii. Pe de altă parte se poate afirma că prin lățimea medie se caracterizează unitar tăietura. Primul efect este reprezentat de interacțiunea dintre viteză și ciclul. Aceasta este urmată de interacțiunea dintre viteză, ciclul și presiunea oxigenului. Pe locul trei se află interacțiunea dintre putere și frecvență. Primele două efecte sunt la fel ca pentru

lățimea la partea inferioară a tăieturii. După acestea se remarcă prezența sub formă de interacțiuni a puterii, presiunii oxigenului și frecvenței. Se remarcă că există un echilibru al efectelor parametrilor care determină timpul de interacțiune dintre radiația laser și material, frecvența ciclul și viteza de tăiere. Nu se poate spune că unul din aceștia are un rol mai mare decât ceilalți. Puterea are o contribuție importantă prin interacțiunile la care participă. Presiunea oxigenului prezintă efecte, prin interacțiuni, care sunt de același nivel cu parametrii care controlează iradierea. Ca efecte ale parametrilor se remarcă cel al frecvenței și al puterii. Acestea au semnificație statistică. Ele sunt mai mici decât unele interacțiuni de ordinul patru. Interacțiunea de ordinul cinci are un efect redus, al treilea de la urmă. Prin aceasta se arată că efectele parametrilor și a interacțiunilor acestora au semnificație. Semnificația statistică este obținută pentru un număr de efecte comparabil cu cel pentru lățimea tăieturii la partea inferioară.

Un interes aparte îl prezintă modulul și semnul primelor două efecte. Prezența presiunii în combinația dintre viteză și ciclu inversează sensul acestui efect. Cantitatea de topitură crește cu timpul de interacțiune. Îndepărtarea unei mari cantități de topitură prin creșterea presiunii oxigenului are un efect evident defavorabil asupra lățimii tăieturii.

În figura 4.22., este prezentată diagrama PARETO pentru lățimea medie a tăieturii în cazul în care sunt eliminate interacțiunile între parametri. Eliminarea interacțiunilor între parametri conduce la pierderea semnificației statistice. Frecvența are primul efect la fel ca și pentru lățimea la partea superioară. Al doilea efect îl are puterea la fel ca și pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii. Ceilalți parametri viteza, ciclul și presiunea oxigenului au un nivel mai scăzut, aproape egal între ei. Se observă că parametrii care controlează iradierea au efecte diferite asupra creșterii lățimii tăieturii. Astfel frecvența și viteza scad lățimea tăieturii iar puterea și viteza o cresc. Această comportare dublă a parametrilor care caracterizează iradierea arată că topitura este supraîncălzită în apropierea temperaturii de vaporizare. Astfel există o zonă sensibilă în care creșterea iradierii poate duce fie la creșterea cantității de topitură, fie la favorizarea vaporizării.

Din evaluarea diagramelor PARETO pentru planul experimental E1 se evidențiază următoarele:

1. Principalele efecte asupra lățimii tăieturii sunt date de interacțiunile între parametri. Excluderea din studiu a interacțiunilor chiar și a celor de ordin superior nu este recomandată. Pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii și lățimea la partea inferioară primele trei efecte conțin toți parametrii variații.

2. Parametrii care controlează iradierea fascicul laser au primul rol. Efectul presiunii oxigenului are un rol secundar în raport cu cel al parametrilor care controlează iradierea.

3. Efectul presiunii oxigenului este mai puternic la partea inferioară a tăieturii decât la partea superioară.

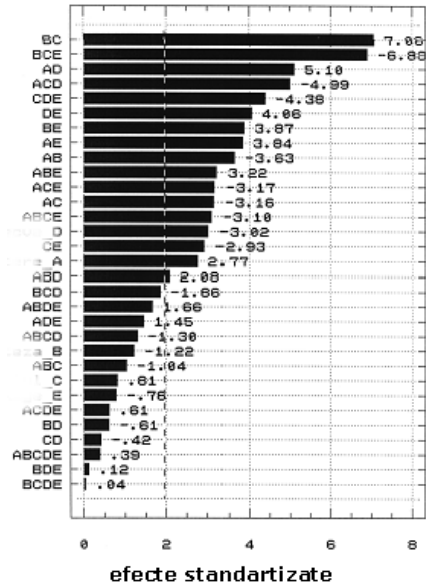


Figura 4.21. – Diagrama PARETO pentru lățimea medie a tăieturii, cu considerarea tuturor interacțiunilor, E1

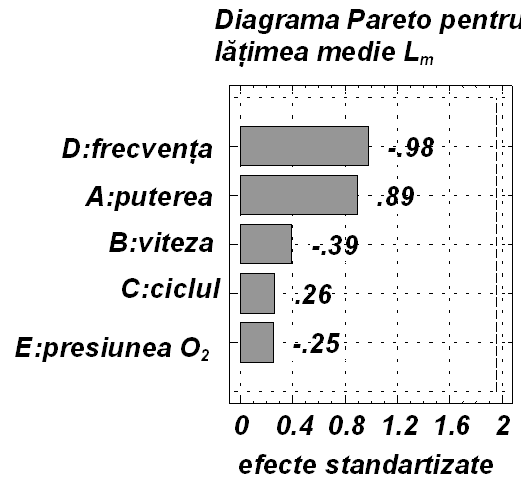


Figura 4.22. – Diagrama PARETO pentru lățimea medie a tăieturii, fără considerarea interacțiunilor, E1

4. Există o variație a rolului principal pe care îl au parametrii care controlează timpul de interacțiune între radiație și material în funcție de situația analizată. Pe rând frecvența, viteza și ciclul au arătat că pot avea rolul principal.

5. Efectul puterii care controlează intensitatea fascicolului laser la același nivel cu parametrul cu efectul cel mai important care controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material.

#### 4.2.3. Analiza suprafețelor de răspuns pentru planul experimental factorial E1

Metoda suprafețelor de răspuns permite o interpretare mai facilă a formulei de corelație. Metoda constă într-o reprezentare tridimensională transformată pe baza modelului matematic unde doi parametrii sunt considerați variabile, restul fiind considerați constanți pentru valorile în punctul central. Aceasta este o formulă de gradul doi incompletă, termenul de gradul doi fiind reprezentat prin produsul celor doi factori. Interpretarea practică se referă la minimele sau maximele prezente în domeniul de variație analizat. Dacă în domeniul de variație nu sunt minime sau maxime atunci suprafața de răspuns va arăta numai o tendință crescătoare sau descrescătoare referitoare la funcția obiectiv.

Analiza suprafețelor de răspuns este legată de formularea unor obiective tehnologice legate de funcția obiectiv analizată. Vor fi analizate lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. Ca obiectiv tehnologic pentru lățimea tăieturii se formulează ca aceasta să fie minimă. Acesta este un obiectiv prea larg și în plus nu poate fi simultan realizat pentru lățimea tăieturii la partea superioară și pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Lățimea minimă a tăieturii este diametrul fascicolului laser. Analiza suprafețelor tăieturilor



prezentată în Capitolul 5 arată că pentru lățimi ale tăieturii peste dublul lățimii minime apar probleme legate de calitatea tăieturii și de stabilitatea procesului de tăiere. Astfel se formulează ca obiectiv tehnologic obținerea de tăieturi cu lățimi între 0,4-0,5 mm. Se vor pune în evidență condițiile în care acest lucru se realizează și cele în care nu se realizează. Creșterea lățimii tăieturii la partea superioară asociată cu scăderea lățimii tăieturii la partea inferioară creează o situație în care tăierea nu se realizează. Suprafețele de răspuns arată situații de extrem favorabile pentru procesul de tăiere sau din contră defavorabile. Se va prezenta modalități de asociere a variației parametrilor care conduc la obținerea de tăieturi înguste.

În figura 4.23., este prezentată suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară cu puterea fasciculului și cu viteza de tăiere. Se observă că sporirea puterii scade lățimea tăieturii la partea superioară. Aceasta arată că odată cu creșterea puterii crește vaporizarea materialului. Se observă că la puteri mici lățimea tăieturii la partea superioară crește cu viteza de tăiere. În acest caz se arată favorizarea contribuției reacției de oxidare. La puteri mari lățimea tăieturii la partea superioară scade cu viteza de tăiere. În această situație se pune în evidență contribuția iradierii cu fascicul laser. Valori minime ale tăieturii la partea superioară se obțin la putere maximă și viteză de tăiere maximă. Valorile optime apar la viteză de tăiere ridicată și putere ridicată, fără ca pentru aceasta să fie selectat nivelul maxim.

În figura 4.24., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea inferioară cu puterea și cu viteza de tăiere. Se observă că pe domeniul experimental există o creștere a lățimii tăieturii la partea inferioară cu puterea și o scădere cu viteza de tăiere. Efectul de scădere al vitezei de tăiere este mai pronunțat pentru puteri mari decât pentru puteri mici. Valori minime ale lățimii la partea inferioară a tăieturii se putere minimă și viteză de tăiere maximă. Aceste situații sunt asociate cu situația în care nu se realizează tăierea. Astfel din punct de vedere tehnologic se recomandă utilizarea unui nivel ridicat al puterii.

Figurile 4.23. și 4.24., arată că efectul puterii la partea superioară a tăieturii este unul de creștere iar pentru lățimea tăieturii la partea inferioară este unul de scădere. În general pentru ambele situații efectul vitezei de tăiere este unul de scădere a lățimii tăieturii. Se observă că pe domeniul experimental variația lățimii tăieturii la partea superioară a tăieturii este mai mică prin comparație cu lățimea tăieturii la partea inferioară. Se confirmă efectul favorabil al alegerii unui nivel ridicat al puterii fasciculului laser pentru ambele mărimi analizate.

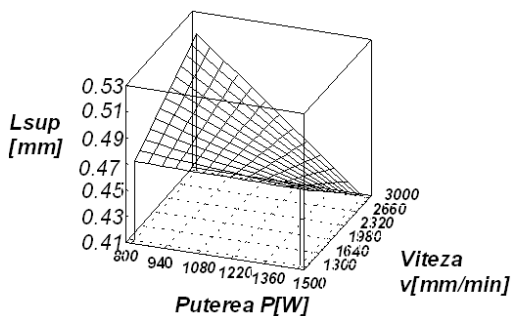


Figura 4.23. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și viteză, E1

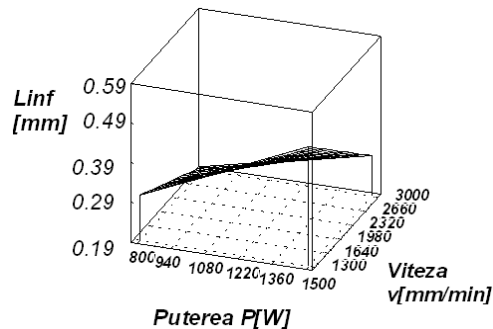


Figura 4.24. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și viteză, E1

În figura 4.25., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară a tăieturii în funcție de puterea fasciculului și ciclu. Pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea superioară scade puternic cu puterea. La puteri mici există o puternică scădere a lățimii tăieturii la partea superioară cu ciclul. La puteri mari există o creștere a lățimii tăieturii la partea superioară cu ciclul. Zona de minim a lățimii tăieturii la partea superioară utilă din punct de vedere tehnologic se obține pentru puteri ridicate și valori ridicate ale ciclului. Minimele absolute, două la număr se obțin pentru puterea minimă, respectiv pentru ciclul minim. Acestea nu sunt însă utile din punct de vedere tehnologic, cele două situații nefiind în principiu recomandate.

În figura 4.26., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară cu puterea fasciculului și cu ciclul. Se observă că lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei crește cu puterea. Pentru puteri mici lățimea la partea inferioară a tăieturii crește puternic cu ciclul. Această creștere este dată de creșterea timpului de interacțiune dintre radiația laser și material. La puteri mari ciclul nu influențează lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Asocierea valorilor extreme, minim – maxim produce apariția a două maxime absolute. Acestea reprezintă situații defavorabile pentru procesul de tăiere. Se recomandă folosirea unor valori apropiate de punctul central al experimentului atât pentru putere cât și pentru ciclu.

Din figurile 4.25 și 4.26 se observă că atât puterea cât și ciclul au o variație contrară pentru lățimea tăieturii la partea inferioară în comparație cu lățimea tăieturii la partea superioară. Aceasta lucru se datorează efectului puternic al vaporizării la suprafața materialului. Creșterea intensității prin putere și creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material cresc contribuția vaporizării. Ca efect se reduce lățimea tăieturii la partea superioară. Aceleași condiții experimentale cresc lățimea tăieturii la partea inferioară prin creșterea cantității de material topit.

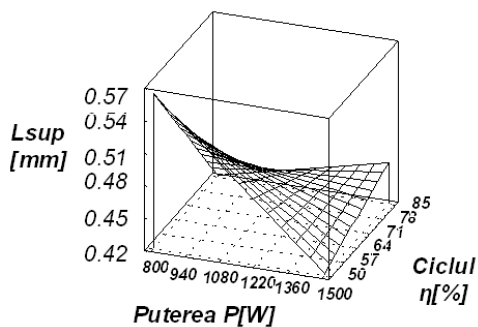


Figura 4.25. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și ciclu, E1

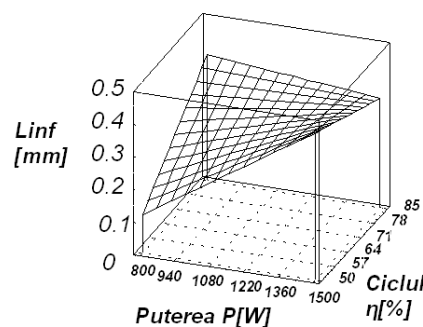


Figura 4.26. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și ciclu, E1

În figura 4.27., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară a piesei funcție de puterea fasciculului laser și frecvența. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea superioară scade puternic cu puterea și cu frecvența. Scăderea lățimii tăieturii la partea superioară cu frecvența este puternică pentru valori mici ale puterii. Scăderea lățimii tăieturii la partea superioară cu frecvența este puternică la puteri mici și aproape inexistentă la puteri mari. Se arată că în condiții de putere redusă

efectul timpului de interacțiune controlat prin frecvență devine important. Tipul general de variație este specific cazului în care prin creșterea intensității fascicolului laser și a timpului de interacțiune între radiația laser și material se favorizează vaporizarea ceea ce scade lățimea tăieturii la partea superioară. Valorile minime pentru lățimea tăieturii la partea superioară se obțin pentru frecvență maximă și putere minimă. Se recomandă asocierea puterilor scăzute cu valori ridicate ale frecvenței și reciproc asocierea valorilor scăzute ale frecvenței cu valori ridicate ale puterii. Astfel lățimea tăieturii la partea superioară a tăieturii se menține într-o zonă de minim.

În figura 4.28., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea inferioară funcție de puterea fascicolului laser și frecvența. Pe domeniul experimental se observă creșterea lățimii la partea inferioară a tăieturii cu puterea fascicolului. La puteri mici creșterea frecvenței scade lățimea tăieturii la partea inferioară. La puteri mari frecvența crește lățimea tăieturii la partea inferioară. Se arată astfel că pentru puteri mici vaporizarea are loc în profunzimea materialului. Minimul pentru lățimea tăieturii la partea inferioară se obține la putere minimă și frecvență maximă. Se recomandă utilizarea de valori maxime ale frecvenței și valori ale puterii apropiate de punctul central pentru a obține valori minime ale lățimii tăieturii la partea inferioară.

Figurile 4.27. și 4.28., pentru variația lățimii tăieturii cu frecvența arată că pe domeniul experimental atât pentru lățimea tăieturii la partea superioară cât și pentru lățimea tăieturii la partea inferioară variația în valori absolute ale lățimii tăieturii este mică. Valorile maxime pentru lățimea tăieturii la partea inferioară coincid cu valorile minime ale lățimii tăieturii la partea superioară. Astfel valorile minime pentru lățimea tăieturii la partea superioară creează condițiile realizării unor tăieturi cu suprafețe plane.

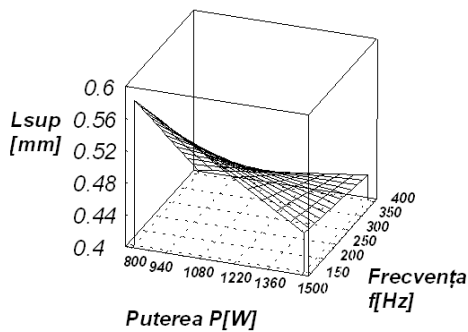


Figura 4.27. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și frecvență, E1

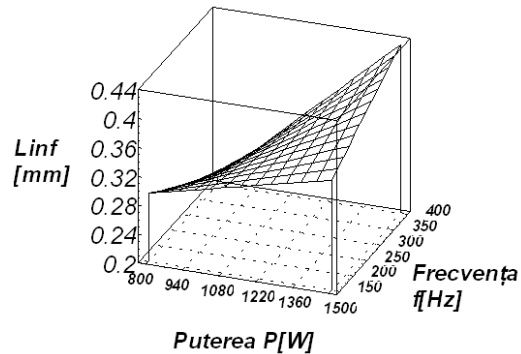


Figura 4.28. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și frecvență, E1

În figura 4.29., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară cu puterea și cu presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental există o creștere a lățimii tăieturii la partea superioară cu presiunea oxigenului și o descreștere puternică a acesteia cu puterea. Se arată astfel că presiunea oxigenului prin reacția de oxidare contribuie la creșterea cantității de material topit și astfel crește lățimea tăieturii la partea superioară. Puterea contribuie la creșterea vaporizării ceea ce produce un efect de scădere a lățimii

tăieturii la partea superioară. Se remarcă că, creșterea lățimii tăieturii la partea superioară cu presiunea oxigenului este aceeași pe tot domeniul experimental. Se arată astfel că presiunea oxigenului este un parametru independent față de iradierea materialului. Valorile minime ale lățimii tăieturii la partea superioară se obțin pentru puterea maximă și presiunea oxigenului minimă. Variațiile în valori absolute ale lățimii tăieturii pe domeniul experimental sunt mici. Astfel nu se pot realiza din grafic valori favorabile pentru presiunea oxigenului.

În figura 4.30., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea inferioară funcție de puterea fasciculului laser și presiunea oxigenului. Se observă că puterea crește lățimea tăieturii la partea inferioară. Această creștere devine puternică pentru presiuni ale oxigenului ridicate și este redusă pentru presiuni reduse ale oxigenului. Se arată astfel că nivelul puterii influențează cantitatea de topitură obținută. La presiune a oxigenului scăzută cantitatea de topitură este ridicată datorită oxidării. Puterea are o influență mică asupra acesteia. La presiuni mari ale oxigenului unde îndepărtarea materialului topit este puternică, puterea fasciculului laser are un rol important asupra topirii materialului la partea inferioară a tăieturii. La puteri mici lățimea tăieturii la partea inferioară scade puternic cu presiunea oxigenului. Prin aceasta se evidențiază sporirea cantității de material topit cu creșterea presiunii oxigenului. La puteri ridicate există o creștere a lățimii tăieturii cu presiunea oxigenului. Aceasta se datorează faptului că se creează condiții favorabile pentru creșterea efectului reacției de oxidare. Valorile minime pentru lățimea tăieturii la partea inferioară se obțin pentru putere minimă și presiune a oxigenului maximă. Se recomandă ca această situație să fie evitată deoarece poate duce la nerealizarea tăieturii. Se recomandă stabilizarea efectului presiunii oxigenului prin folosirea unui nivel ridicat al puterii.

Figurile 4.29. și 4.30., arată că efectele puterii și presiunii oxigenului pentru lățimea tăieturii la partea inferioară, respectiv lățimea tăieturii la partea superioară, pot fi contrare. În acest context o importanță deosebită o au valorile în punctul central al experimentului.

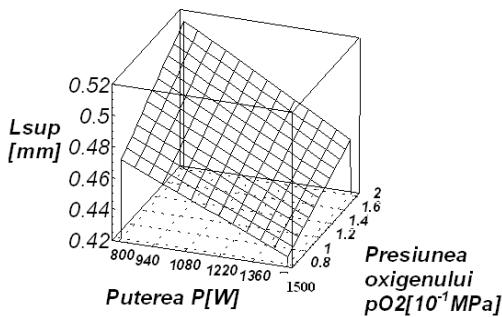


Figura 4.29. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și presiunea oxigenului, E1

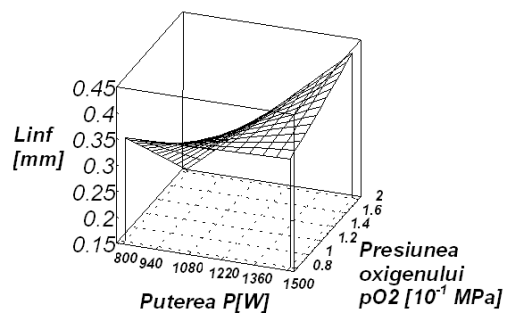


Figura 4.30. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și presiunea oxigenului, E1

Figura 4.31., prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară cu viteza de tăiere și cu ciclul. Ambii parametrii determină modificarea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material. Se observă că există o zonă de stabilizare a lățimii tăieturii pentru valori mici ale ciclului la valori

mici ale vitezei de tăiere. Pentru valori mari ale ciclului lățimea tăieturii la partea superioară scade puternic cu viteza tăiere. Se arată astfel că ciclul este un parametru care favorizează producerea vaporizării. Viteza de tăiere are efect principal asupra fazei topite. La valori mici ale ciclului și mari ale vitezei de tăiere se favorizează reacția de oxidare, care produce topitură. Astfel efectul vitezei de tăiere nu poate fi pus în evidență. Pentru a obține valori minime ale lățimii tăieturii se recomandă folosirea de valori ridicate pentru ciclu și viteza de tăiere.

În figura 4.32., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii la partea inferioară a tăieturii funcție de viteza de tăiere și ciclul. Se observă că există un nivel constant al lățimii tăieturii la partea inferioară pe domeniul experimental. Față de acest nivel există o scădere puternică pentru valori ridicate ale vitezei de tăiere și valori mici ale ciclului. Se arată astfel că la partea inferioară a tăieturii atât viteza cât și ciclul controlează cantitatea de topitură. Scăderea lățimii la partea inferioară a tăieturii se datorează scăderii cantității de topitură. Valorile minime pentru lățimea tăieturii la partea inferioară se obțin la viteza de tăiere maximă și valorile minime ale ciclului. Această combinație a parametrilor trebuie evitată deoarece poate duce la nerealizarea tăierii. Se recomandă valori ridicate ale ciclului indiferent de viteza de tăiere.

Din figurile 4.31. și 4.32., se observă că efectul ciclului la viteza de tăiere maximă asupra lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei este contrar efectului asupra lățimii tăieturii la partea superioară în aceleași condiții. Astfel se recomandă să nu se utilizeze valori foarte ridicate ale vitezei de tăiere.

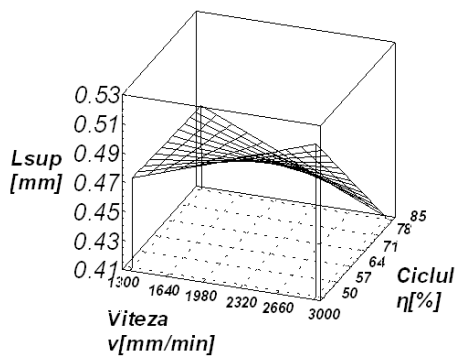


Figura 4.31. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și ciclu, E1

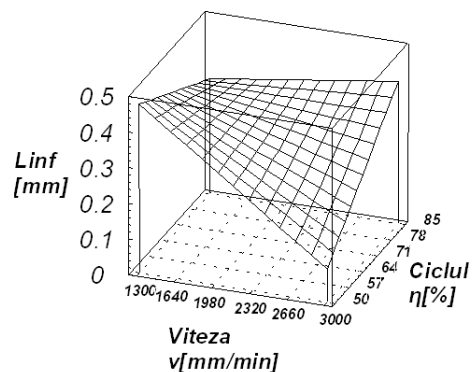


Figura 4.32. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și ciclu, E1

În figura 4.33., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea superioară raportat la modificarea vitezei de tăiere și frecvenței. Ambii parametri modificați controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material și au efecte contrare asupra valorilor acestuia. Astfel creșterea vitezei de tăiere scade durata de interacțiune între radiația laser și material. Creșterea frecvenței crește durata de interacțiune între radiația laser și material. Se observă că la frecvențe mici lățimea tăieturii la partea superioară practic nu se modifică cu viteza de tăiere. La frecvențe mari există o scădere a lățimii tăieturii cu creșterea vitezei de tăiere. Pe domeniul experimental are loc scăderea lățimii tăieturii cu frecvența. Se arată astfel că timpul de interacțiune ridicat este asociat cu vaporizarea materialului. Creșterea vaporizării va scădea lățimea tăieturii la partea

superioară a piesei. La viteză de tăiere ridicată vaporizarea materialului devine mai eficientă și produce scăderea lățimii tăieturii la partea superioară a piesei.

Modificarea valorilor lățimii tăieturii la partea superioară pe domeniul experimental este relativ mică însă ele sunt relativ ridicate ca valoare absolută. Se recomandă utilizarea valorilor minime pe domeniul experimental. Acestea se obțin la viteză de tăiere maximă și frecvență maximă.

În figura 4.34., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară cu viteza de tăiere și cu frecvența. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii scade puternic cu viteza de tăiere. Durata de interacțiune dintre radiația laser și material este în acest caz asociată cu producerea de topitură și nu cu vaporizarea materialului. Efectul frecvenței este redus comparativ cu cel al vitezei de tăiere. La viteze mici frecvența produce scăderea lățimii tăieturii la partea inferioară iar la viteze mari o crește. Se recomandă valorile care dau minimul lățimii tăieturii la partea inferioară. Acestea se obțin la o viteză de tăiere ridicată, aproape independent de valorile frecvenței.

Figurile 4.33. și 4.34., arată că în ceea ce privește lățimea, obținerea unor tăieturi cu lățimi reduse se recomandă valori ridicate ale frecvenței și vitezei de tăiere. În această situație există posibilitatea obținerii unor tăieturi având calitate ridicată.

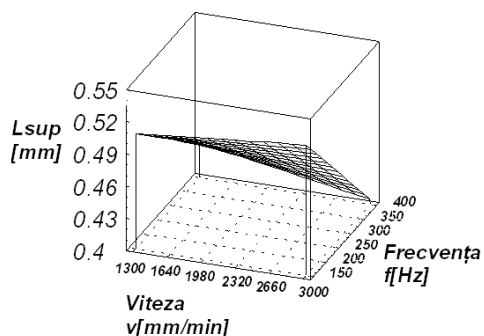


Figura 4.33. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și frecvență, E1

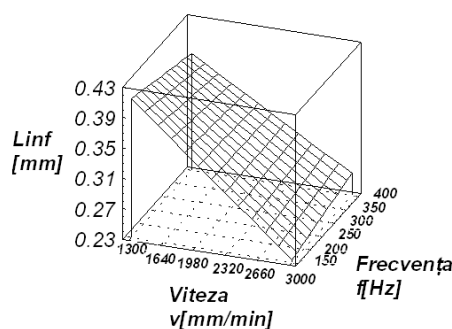


Figura 4.34. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și frecvență, E1

În figura 4.35., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară cu viteza de tăiere și cu presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental există o creștere a lățimii tăieturii la partea superioară cu presiunea oxigenului. Aceasta nu este mare în valori absolute. Creșterea lățimii tăieturii la partea superioară se datorează intensificării reacției de oxidare. Se crește astfel cantitatea de material topit. La presiuni ale oxigenului mari scăderea lățimii tăieturii la partea superioară cu viteza de tăiere este atenuată. Se recomandă folosirea unor valori ridicate pentru presiunea oxigenului chiar dacă pentru acestea nu se obțin valori minime pentru lățimea tăieturii la partea superioară. Diferențele între valori sunt mici astfel că nu se pot stabili valori optime pentru presiunea oxigenului.

În figura 4.36., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară a tăieturii în funcție de viteza de tăiere și presiunea oxigenului. Se observă că viteza de tăiere scade lățimea tăieturii la partea

inferioară. Aceasta scădere este mai puternică la presiuni mici decât la presiuni mari. Se arată că prin creșterea presiunii oxigenului crește cantitatea de topitură. La viteze de tăiere reduse presiunea oxigenului scade lățimea tăieturii la partea inferioară. La viteze de tăiere mari presiunea oxigenului crește lățimea tăieturii la partea inferioară. La viteze de tăiere mici are loc producerea unei cantități mari de topitură. La presiune ridicată are loc o îndepărtare excesivă a materialului topit care va fi defavorabilă reacției de oxidare. Valorile minime pentru lățimea tăieturii la partea inferioară se obțin pentru viteza de tăiere maximă și presiunea minimă. Se recomandă utilizarea de valori ridicate pentru viteza de tăiere și presiunea oxigenului.

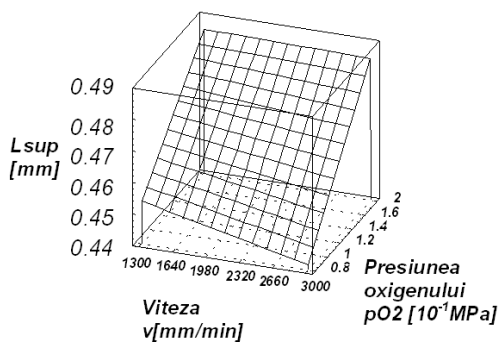


Figura 4.35. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și presiunea oxigenului, E1

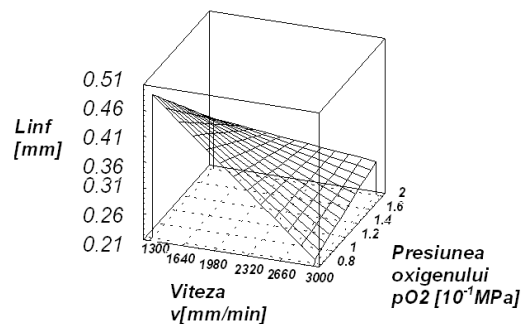


Figura 4.36. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și presiunea oxigenului, E1

Figurile 4.35. și 4.36., arată că efectul presiunii oxigenului este mai puternic decât cel al vitezei de tăiere. Viteza de tăiere scade lățimea tăieturii, această tendință poate fi modificată de efectul presiunii oxigenului. În general efectul creșterii presiunii oxigenului se manifestă prin creșterea cantității de topitură atât la partea superioară cât și la partea inferioară a piesei.

În figura 4.37., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară a tăieturii funcție de frecvență și ciclul. Ambii parametri controlează durata de interacțiune dintre radiația laser și material. Atât ciclul cât și frecvența cresc durata de interacțiune între radiația laser și material. Se observă că lățimea tăieturii la partea superioară scade atât cu ciclul cât și cu frecvența. Se arată astfel că, creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material duce la creșterea vaporizării și astfel scade lățimea tăieturii la partea superioară a tăieturii. Se observă că la frecvențe mici ciclul are un efect puternic asupra variației lățimii tăieturii la partea superioară a piesei iar la valori mici ale ciclului efectul frecvenței este puternic. Se recomandă utilizarea de valori ridicate pentru ciclu și frecvență, pentru acestea se obțin valori reduse ale lățimii tăieturii la partea superioară.

În figura 4.38., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei cu ciclul și cu frecvența. Se observă că lățimea la partea inferioară a tăieturii crește cu ciclul și cu frecvența. Se arată astfel că pentru lățimea tăieturii la partea inferioară creșterea timpului de interacțiune va duce la creșterea de material topit. Se arată un efect puternic al ciclului la frecvențe mici și reciproc un efect puternic al ciclului la valori mici ale frecvenței. Valorile



minime ale lățimii tăieturii la partea inferioară se obțin la valori minime ale ciclului și valori minime ale frecvenței. Această combinație a parametrilor nu este recomandată deoarece poate ca tăierea să eșueze. Se recomandă valori ridicate ale frecvenței și ciclului. Pentru acestea se obține un domeniu unde lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei este stabilă.

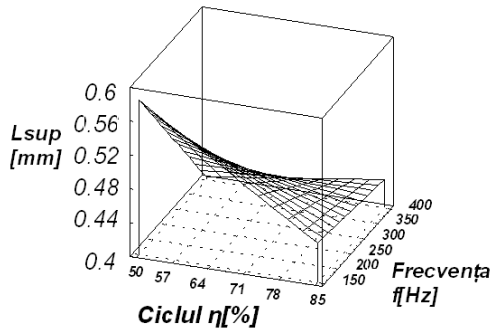


Figura 4.37. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de ciclu și frecvență, E1

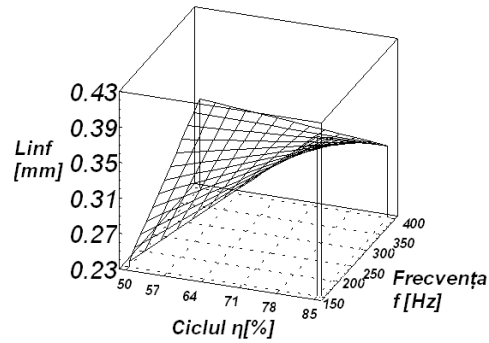


Figura 4.38. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de ciclu și frecvență, E1

Figurile 4.37. și 4.38., arată efecte contrare ale frecvenței și ciclului asupra lățimii tăieturii la partea superioară, respectiv la partea inferioară a tăieturii. Efectul fasciculului laser este asociat cu vaporizarea materialului la partea superioară a tăieturii respectiv cu topirea la partea inferioară. Folosirea de valori ridicate pentru ciclu și frecvență asigură minimizarea vaporizării materialului și maximizarea topirii materialului. În această situație lățimea tăieturii este stabilă cu variația ciclului și a frecvenței ceea ce duce la o mai bună posibilitate de reglaj a celorlalți parametri și în primul rând al vitezei de tăiere. Viteza de tăiere are deci efect descrescător asupra duratei de interacțiune între radiația laser și material.

În figura 4.39., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea superioară a tăieturii funcție de ciclu și cu presiunea oxigenului. Se observă că lățimea tăieturii crește cu presiunea oxigenului. Creșterea ciclului produce scăderea lățimii tăieturii. Se arată că creșterea ciclului produce creșterea timpului de interacțiune, care favorizează vaporizarea. Se observă că efectul presiunii oxigenului este puternic la valori mari ale ciclului și este redus pentru valori mici ale ciclului. Variația dată de presiunea oxigenului pe domeniul experimental în valori absolute este mică. Valoarea minimă pentru lățimea tăieturii la partea superioară se obține pentru valoarea maximă a ciclului și valoarea minimă a presiunii oxigenului. Se recomandă utilizarea valorii maxime pentru ciclu indiferent de valoarea presiunii oxigenului.

În figura 4.40., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei funcție de ciclu și presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea inferioară crește cu ciclul. Presiunea oxigenului produce un efect puternic numai la valori mari ale ciclului. În această situație creșterea presiunii oxigenului scade lățimea tăieturii la partea inferioară. Se arată că, creșterea cantității de topitură datorată creșterii ciclului contribuie la intensificarea reacției de oxidare. Creșterea presiunii oxigenului duce la îndepărtarea de topitură și prin urmare se reduce contribuția reacției de



oxidare. Se recomandă utilizarea de valori ridicate ale ciclului și valori ridicate ale presiunii oxigenului.

Figurile 4.39. și 4.40., arată o variație, în principiu, opusă pentru lățimea tăieturii la partea superioară, respectiv partea inferioară a tăieturii la variația ciclului și a presiunii oxigenului. Ciclul are aceleași efecte ca și cele observate în reprezentările grafice anterioare. Variațiile produse asupra lățimii tăieturii de presiunea oxigenului sunt mici, apropiate de 0,1 mm.

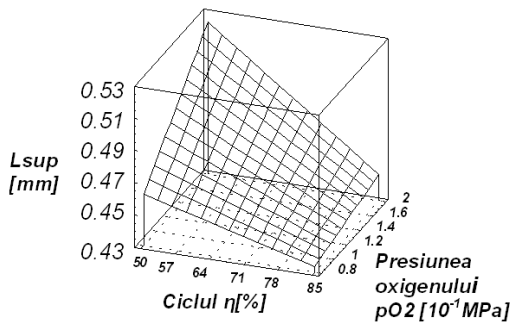


Figura 4.39. - Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de ciclu și presiunea oxigenului, E1

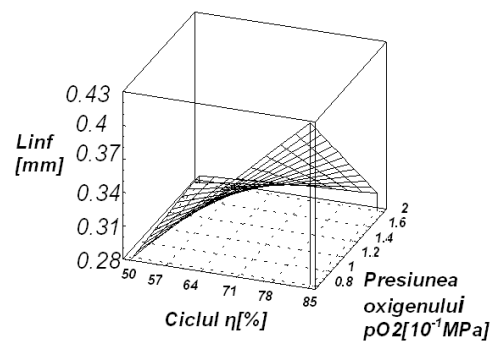


Figura 4.40. - Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de ciclu și presiunea oxigenului, E1

În figura 4.41., se prezintă suprafața de răspuns pentru variația lățimii tăieturii la partea superioară a piesei funcție de frecvența și presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea superioară scade cu frecvența. Această scădere se datorează favorizării vaporizării odată cu creșterea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material prin creșterea frecvenței. Presiunea oxigenului produce o ușoară creștere a lățimii tăieturii la partea superioară a piesei. Aceasta se datorează intensificării reacției de oxidare odată cu creșterea presiunii oxigenului.

Valorile minime ale lățimii tăieturii la partea superioară se obțin pentru valori maxime ale frecvenței și valori minime ale presiunii oxigenului. Se recomandă utilizarea de valori maxime ale frecvenței indiferent de valorile presiunii oxigenului.

În figura 4.42., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei. Se observă că la frecvențe reduse presiunea oxigenului scade lățimea tăieturii la partea inferioară. Aceasta arată îndepărtarea excesivă de topitură cu creșterea presiunii oxigenului. La frecvențe ridicate unde există multă topitură creșterea presiunii oxigenului favorizează reacția de oxidare. La presiuni ale oxigenului mici lățimea tăieturii la partea inferioară scade cu frecvența. În această situație topirea materialului este defavorizată odată cu creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material prin frecvență. La presiuni mari creșterea frecvenței produce creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară a tăieturii. Se arată că în aceste condiții se favorizează reacția de oxidare și prin urmare topirea materialului. Valorile minime ale lățimii tăieturii la partea inferioară se obțin la valori minime ale frecvenței și maxime ale presiunii oxigenului. Recomandabile rămân valorile cele ridicate ale frecvenței indiferent de presiunea oxigenului.

Figurile 4.41. și 4.42., arată că efectul presiunii oxigenului relativ la variația frecvenței sunt mai mari decât cele care se înregistrează la variația ciclului. Cu toate acestea efectul frecvenței este mai puternic decât cel al presiunii. Se observă o stabilizare a lățimii tăieturii la partea inferioară la centrul domeniului experimental funcție de frecvență și putere. La frecvențe ridicate există posibilitatea de a se obține unele tăieturi cu suprafețe plane.

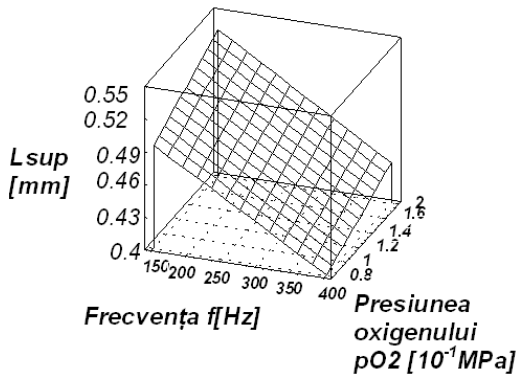


Figura 4.41. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de frecvență și presiunea oxigenului, E1

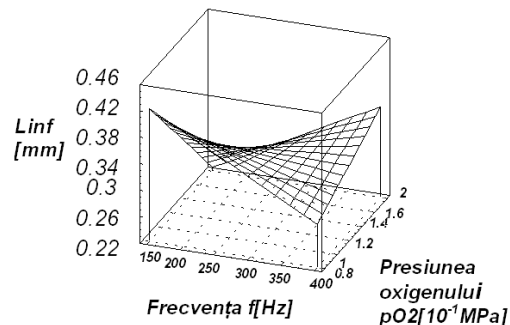


Figura 4.42. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de frecvență și presiunea oxigenului, E1

În urma analizei suprafețelor de răspuns se pot formula următoarele observații asupra efectului parametrilor implicați:

- Parametrii care controlează iradierea se asociază cu prezența fenomenului de vaporizare pentru lățimea tăieturii la partea superioară și cu fenomenul de topire pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei.
- Efectul presiunii oxigenului este scăzut asupra lățimii tăieturii, în comparație cu efectul parametrilor care controlează iradierea.
- Cu creșterea presiunii oxigenului crește cantitatea de topitură indiferent de valorile celorlalți parametri.

Se observă că tendința generală a efectului modificării presiunii oxigenului este ca poziția suprafeței de răspuns pentru lățimea inferioară a tăieturii să fie invers față de lățimea la partea superioară.

#### 4.2.4. Analiza planului experimental factorial incomplet $2^{5-2}$ E2

Experimentul E2 a avut ca obiectiv studiul efectelor produse de mărirea distanța dintre diuză și piesă de la 1mm la 2mm. S-au păstrat aceleași valori pentru nivelul superior și nivelul inferior al parametrilor definiți și implicați. S-a redus însă numărul de experimentări. Experimentul factorial incomplet a considerat combinații complete între nivelele parametrilor au fost considerate numai pentru putere, viteză și ciclul. Datorită faptului că s-a redus numărul experimentărilor, acest plan experimental a furnizat numai relații care exclud interacțiunile între parametri. Modelele matematice realizate sunt prezentate în tabelele 4.4., 4.5. și 4.6.

Tabel 4.4. – Modelul matematic pentru lățimea la partea superioară a tăieturii piesei pentru planul factorial incomplet  $2^{5-2} E2$

Formula de corelație în mărimi codificate	
$L_{sup} = 0.5895 + 0.0201A - 0.1038B + 0.0016C - 0.0041D + 0.0176E$	
	[mm](1)
Formula de corelație în mărimi reale	
$L_{sup} = 0.7478 + 5.728 \cdot 10^{-5} P - 1.21 \cdot 10^{-4} v + 9.13 \cdot 10^{-5} \eta$ $- 3.28 \cdot 10^{-5} f + 2.922 \cdot 10^{-1} P_{O_2}$	
	[mm] (2)
Coeficienții de corelație	
$R^2 = 0.58$	$R^2 (adj \text{ for } d.f.) = 0.06$

Tabel 4.5. – Modelul matematic pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei pentru planul factorial incomplet  $2^{5-2} E2$

Formula de corelație în mărimi codificare	
$L_{inf} = 0.4004 - 0.0753A + 0.0054B + 0.0169C - 0.1055D + 0.0459E$	
	[mm] (1)
Formula de corelație în mărimi reale	
$L_{inf} = 0.6941 - 2.146 \cdot 10^{-4} P + 6.31 \cdot 10^{-6} v + 9.65 \cdot 10^{-4} \eta$ $- 8.44 \cdot 10^{-4} f + 7.619 \cdot 10^{-2} P_{O_2}$	
	[mm] (2)
Coeficienții de corelație	
$R^2 = 0.72$	$R^2 (adj \text{ for } d.f.) = 0.38$

Alături de aceste modele au mai fost realizate modele matematice care consideră produsul parametrilor (tabelul 4.7.). Aceste modele se obțin pe baza unui model polinomial liniar ca și cele prezentate anterior. Se consideră pentru parametrii ca variabile, pentru nivelul inferior și nivelul superior al parametrilor și pentru funcția obiectiv logaritmul valorilor respective.

După de logaritizarea relației obținute va rezulta modelul matematic în produs. Pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii s-a adăugat o unitate pentru a putea realiza logaritizarea în cazul în care valoarea pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii este zero. Studiul statistic s-a realizat tot prin metoda de analiză a variațiilor ANOVA.

Tabel 4.6. – Modelul matematic pentru lățimea medie a tăieturii pentru planul factorial incomplet  $2^{5-2} E2$ 

Formula de corelație în mărimi codificate	
$L_{med} = 0.4946 - 0.0275A - 0.0491B + 0.0093C - 0.0551D + 0.031E$ [mm] (1)	
Formula de corelație în mărimi reale	
$L_{med} = 0.7222 - 7.83 \cdot 10^{-5} P - 5.74 \cdot 10^{-5} v + 5.31 \cdot 10^{-4} \eta - 4.4 \cdot 10^{-4} f + 5.1 \cdot 10^{-1} P_{O_2}$ [mm] (2)	
Coeficienții de corelație	
$R^2 = 0.65$	$R^2(\text{adj for d.f.}) = 0.22$

Formulele de corelație obținute prin această metodă pot fi folosite numai pentru valorile parametrilor cu unitățile de măsură definite în programul experimental. Constanta din formulă și valorile exponenților sunt relative la unitățile de măsură folosite pentru parametrii. Se poate observa numai care parametrii cresc și care parametrii descresc funcția obiectiv analizată.

Tabel 4.7. – Modele matematice care conțin produsul parametrilor

Corelația și Coeficienții de corelație	
$L_{sup} = 10.4089 \cdot P^{0.129} \cdot v^{-0.485} \cdot \eta^{0.007} \cdot f^{-0.010} \cdot P_{O_2}^{0.083}$ [mm] (1)	
$R^2 = 0.55$	$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.007$
$L_{inf} + 1 = 65058.6 P^{-1.89} \cdot v^{0.006} \cdot \eta^{0.076} \cdot f^{-0.171} \cdot P_{O_2}^{0.09}$ [mm] (2)	
$R^2 = 0.69$	$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.31$
$L_{med} = 4.45 \cdot 10^8 \cdot P^{-2.69} \cdot v^{-0.258} \cdot \eta^{0.202} \cdot f^{-0.312} \cdot P_{O_2}^{0.218}$ [mm] (3)	
$R^2 = 0.62$	$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.14$

Pentru planul factorial incomplet sunt prezentate diagrame PARETO care arată ierarhizarea parametrilor. Acest tip de experiment nu a permis considerarea interacțiunilor între parametrii. Interpretarea diagramelor PARETO va ține seama de faptul că prin mărirea distanței dintre diuză și piesă s-a realizat focalizarea către suprafața piesei. A crescut intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei. Astfel rolul puterii va fi mai bine pus în evidență.

În figura 4.43., se prezintă diagrama PARETO pentru lățimea tăieturii la partea superioară. Se observă că primul efect este cel al vitezei. Durata de interacțiune între radiația laser și material are cea mai puternică influență. Se arată că este menținută stabil în material o transformare de fază (topire și aducerea materialului la temperatura de vaporizare), a cărei extindere în material este dată de durata de interacțiune între radiația laser și material. Următorii parametrii sunt

puterea și presiunea oxigenului. Aceștia cresc cantitatea de material și prin aceasta lățimea tăieturii la partea superioară. Frecvența și ciclul, ceilalți doi parametri care reglează durata de interacțiune între radiația laser și material au ultimele efecte. Frecvența care crește durata de interacțiune favorizează vaporizarea și prin aceasta scade lățimea tăieturii la suprafața piesei. Se observă că nici unul din parametri nu este statistic semnificativ. Aceasta înseamnă că efectele importante revin interacțiunilor între parametri.

În figura 4.44., se prezintă diagrama PARETO pentru lățimea tăieturii la partea inferioară. Se observă că primul efect este cel al frecvenței. Se arată astfel că durata de interacțiune între radiația laser și material are un rol important. Prin efectul frecvenței se arată că lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei scade cu creșterea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material. Se arată astfel că efectul fenomenului de evaporare este puternic pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Următoarele efecte sunt ale puterii fasciculului laser și presiunii oxigenului. Acestea sunt de semn contrar. Astfel, puterea fasciculului laser favorizează vaporizarea materialului și scade lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei. Presiunea oxigenului produce creșterea cantității de material topit și prin aceasta crește lățimea tăieturii la partea inferioară. Viteza și ciclul au un efect redus. Se observă că efectele parametrilor nu au semnificație statistică. Prin aceasta se arată că interacțiunile între parametri au un efect puternic.

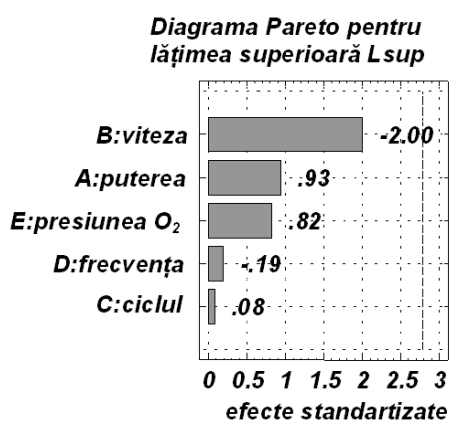


Figura 4.43. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, E2

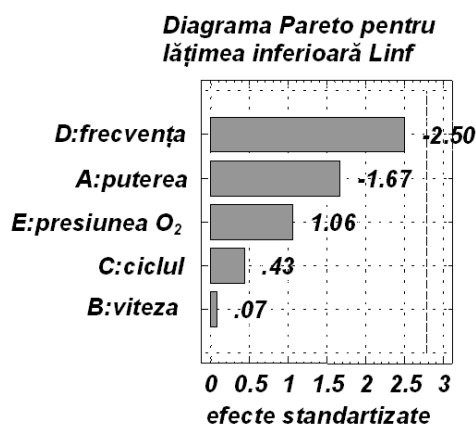


Figura 4.44. – Diagrama PARETO pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, E2

În cele două situații anterior analizate se arată că unul dintre parametri care controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material frecvența, viteza și ciclul au primul efect. Ceilalți doi au ultimele efecte. Puterea fasciculului laser are al doilea efect. Se arată astfel că, parametrii care controlează iradierea au un efect mai puternic decât presiunea oxigenului. Lucru care apare interesant este că lățimea tăieturii la partea superioară este legată de topirea materialului (cu supraîncălzirea topiturii) iar lățimea tăieturii la partea inferioară este legată de fenomenul de vaporizare. Prin aceasta se arată că formarea lățimii tăieturii la partea superioară și a lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei nu poate fi privite ca fiind fenomene simultane așa cum s-a întâmplat în cazul experimentului factorial E1. Lățimea tăieturii la partea superioară a piesei se formează prima fiind asociată cu

topirea și supraîncălzirea materialului iar lățimea tăieturii la partea inferioară se formează ulterior prin vaporizarea topiturii supraîncălzite.

În figura 4.45., se prezintă diagrama PARETO pentru efectele asupra lățimii medii a tăieturii. Se observă că primul efect este cel al frecvenței. Acesta este singurul efect care are semnificație statistică. Efectul frecvenței este asociat cu creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material și cu intensificarea efectelor datorate vaporizării materialului. Lățimea medie a tăieturii scade cu frecvența de pulsare. Al doilea efect este cel al presiunii oxigenului. Acesta este asociat cu formarea de topitură și cu creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară. Se observă că efectul presiunii oxigenului depășește efectul puterii. Puterea are un efect de favorizare a vaporizării și prin aceasta de scădere a lățimii tăieturii. Viteza deși scade durata de interacțiune, scade lățimea medie a tăieturii. Pe ansamblu, viteza de tăiere și ciclul produc efecte importante.

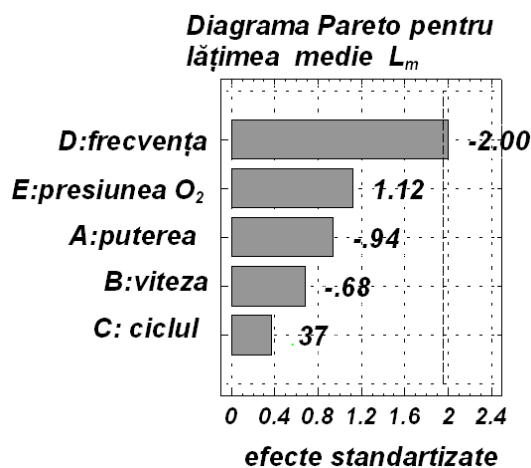


Figura 4.45. – Diagrama PARETO pentru lățimea medie a tăieturii, E2

Planul experimental E2 prin creșterea intensității fasciculului laser la suprafața piesei a dus la prezența unei situații diferite din punct de vedere fenomenologic. S-a arătat astfel că poziția planului focal în raport cu suprafața piesei este importantă. În principiu efectele obținute pentru parametrii modificați, exprimate prin suprafețe de răspuns nu pot fi comparate între cele două situații din experimentele E1, respectiv experimentul E2.

Suprafețele de răspuns pentru planul experimental E2 sunt de tip liniar (plane). Variațiile prezentate de acestea sunt mai apropiate de realitate în partea centrală a domeniului experimental. Din acest motiv este dificil să se discute situații de extrem pentru aceste reprezentări grafice.

Figura 4.46., prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea superioară, cu puterea și cu viteza de tăiere. Se observă că lățimea tăieturii are o scădere puternică cu viteza de tăiere pe domeniul experimental. Puterea fasciculului laser provoacă o ușoară creștere a lățimii tăieturii la partea superioară pe domeniul experimental. Se observă că modificările provocate de viteza de tăiere pe domeniul experimental pentru lățimea la partea superioară, sunt relativ mari. Aceasta este o dovadă a asocierii lățimii tăieturii la partea superioară cu topirea materialului. Durata de interacțiune între radiația laser și material devine importantă în aceste condiții.

În figura 4.47., este prezentată suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei cu puterea și cu viteza de tăiere. Se observă că efectele provocate pe domeniul experimental sunt mai mici decât pentru lățimea la partea superioară a tăieturii. De asemenea, se observă că pe domeniul experimental, lățimea tăieturii scade puternic cu puterea. Viteza de tăiere produce o ușoară creștere. Creșterea puterii fasciculului laser este asociată cu creșterea vaporizării și creșterea mișcării topitului, fenomene defavorabile obținerii de material topit și prin urmare lățimea topitului la partea inferioară scade.

În figura 4.48., se prezintă modificarea lățimii tăieturii la partea superioară cu puterea și cu ciclul. Variația pe domeniul experimental în aceste condiții este mică, sub 0,01 mm. Se observă că puterea fasciculului laser crește lățimea tăieturii la partea superioară pe domeniul experimental. Se arată că relativ la cantitatea de material topit care se obține efectul puterii fasciculului laser este mai mare decât cel al ciclului. Relativ la valorile absolute ale lățimii tăieturii la partea superioară a căror variație este foarte mică se poate spune că în condițiile experimentale date, nu se produc variații, iar cantitatea de topitură obținută este relativ constantă.

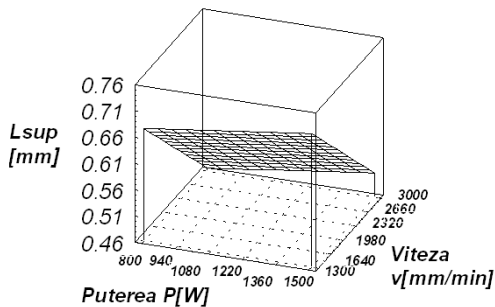


Figura 4.46. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și viteză, E2

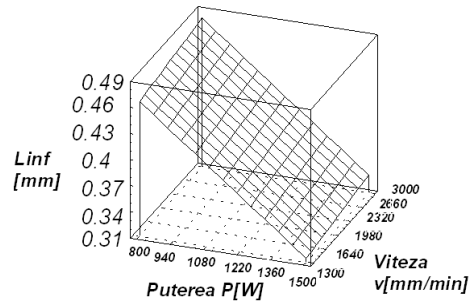


Figura 4.47. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și viteză, E2

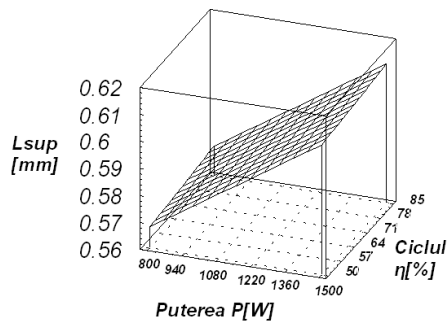


Figura 4.48. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și ciclu, E2

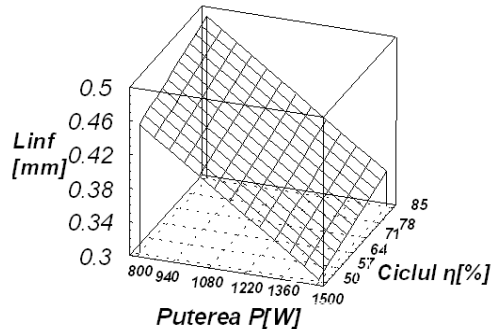


Figura 4.49. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și ciclu, E2

În figura 4.49., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei funcție de puterea fasciculului laser și ciclu. Se observă că lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei scade cu puterea și are o ușoară creștere cu ciclul. Se arată astfel că prin creșterea puterii se favorizează

transformări de fază cu căldură latentă ridicată, în special vaporizarea materialului. Creșterea duratei de interacțiune prin ciclu favorizează obținerea de topitură.

În figura 4.50. se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea superioară, în funcție de puterea fasciculului laser și frecvență. Se observă că variația în valori absolute pe domeniul experimental este mică. Lățimea tăieturii la partea superioară crește puternic cu puterea fasciculului laser și nu variază cu frecvența. Se remarcă că între parametrii care controlează iradierea, rolul puterii crește. Aceasta are o contribuție mai mare decât ceilalți parametrii care controlează durata de interacțiune între radiația laser și material.

În figura 4.51., se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară, în funcție de putere și frecvență. Se observă că pe domeniul experimental există modificări puternice ale lățimii tăieturii la partea inferioară. Aceasta scade pe domeniul experimental atât cu frecvența cât și cu puterea fasciculului laser. Se arată astfel că iradierea excesivă favorizează vaporizarea.

În figura 4.52., se prezintă variația lățimii tăieturii la partea superioară a materialului cu puterea fasciculului laser și presiunea oxigenului. Se observă că lățimea tăieturii la partea superioară crește atât cu puterea fasciculului laser cât și cu presiunea oxigenului. Astfel, cantitatea de material topit crește cu creșterea puterii. Creșterea presiunii oxigenului duce la creșterea cantității de material topit. Se observă că variațiile pe domeniul experimental ale lățimii tăieturii la partea superioară sunt relativ reduse.

Efectul modificării lățimii tăieturii la partea inferioară a materialului cu puterea fasciculului laser și presiunea oxigenului se prezintă în figura 4.53. Efectul pe domeniul experimental este relativ mare, se observă că puterea scade puternic lățimea tăieturii la partea inferioară. Presiunea oxigenului crește lățimea tăieturii la partea inferioară. Astfel, efectul presiunii oxigenului de a favoriza obținerea de topitură este constant atât pentru lățimea tăieturii la partea superioară cât și la partea inferioară.

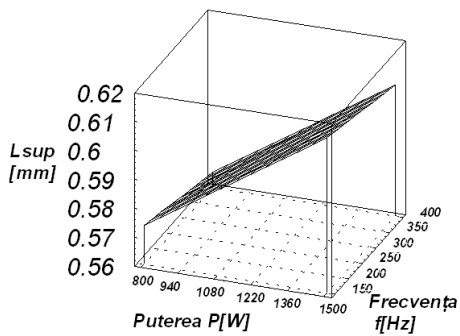


Figura 4.50. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de putere și frecvență, E2

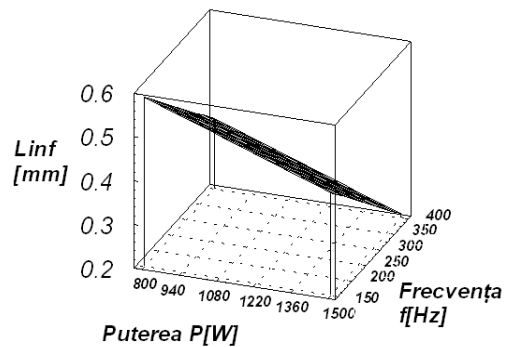


Figura 4.51. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de putere și frecvență, E2



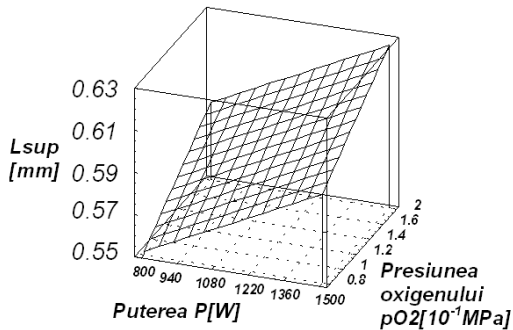


Figura 4.52. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară funcție de putere și presiunea oxigenului, E2

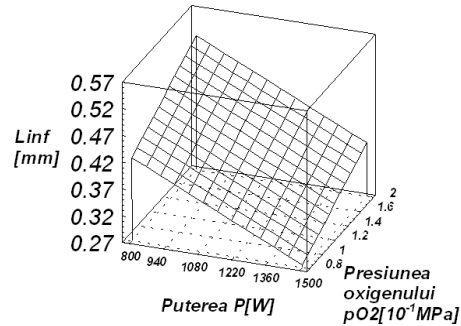


Figura 4.53. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară funcție de putere și presiunea oxigenului, E2

În figura 4.54., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificări ale lățimii tăieturii la partea superioară cu viteza și ciclul. Se observă o scădere puternică a lățimii tăieturii cu viteza. Ciclul nu influențează, în acest caz, lățimea tăieturii la partea superioară. Se arată astfel că, cantitatea de material topit obținută este dependentă de durata de interacțiune dintre radiația laser și material, controlat prin viteza de tăiere.

Efectul modificării lățimii tăieturii la partea inferioară, în funcție de viteză și ciclu se prezintă în figura 4.55. Afectarea lățimii tăieturii la partea inferioară este mică pe domeniul experimental. Se arată astfel, lățimea tăieturii la partea inferioară crește cu viteza și cu ciclul. Viteza de lucru și ciclul au efecte contrare asupra duratei de interacțiune dintre radiația laser și material. Efectul scăderii duratei de interacțiune cu viteza este mai puternic decât efectul de creștere a duratei de interacțiune cu ciclul. Scăderea duratei de interacțiune favorizează obținerea de topitură și defavorizează vaporizarea și mișcarea topiturii. Consecința este creșterea lățimii tăieturii la partea inferioară.

În figura 4.56., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea superioară în funcție de viteza de tăiere și frecvență. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea superioară scade puternic cu viteza de tăiere. Frecvența nu produce nici o modificare. Se arată astfel că, scăderea duratei de interacțiune cu viteza este mai puternică decât creșterea acesteia cu frecvența. În situația dată, cantitatea de topitură formată depinde direct de timpul de interacțiune între radiația laser și material.

Efectul modificării lățimii tăieturii la partea inferioară a materialului funcție de viteza de lucru și frecvență se prezintă în figura 4.57. Modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară pe domeniul experimental este mai redusă decât în cazul lățimii tăieturii la partea superioară a piesei, dar totuși considerabilă. Se observă că lățimea tăieturii la partea inferioară scade pe domeniul experimental cu frecvența și nu depinde de viteza de tăiere. Se arată astfel că, creșterea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material duce la creșterea vaporizării.

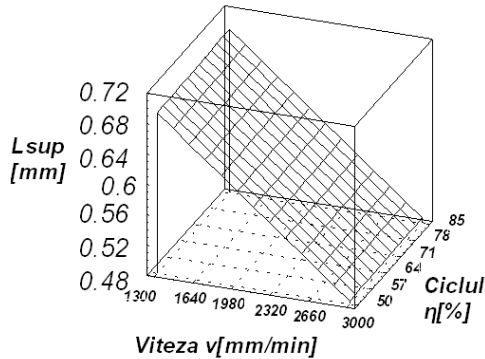


Figura 4.54. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și ciclu, E2

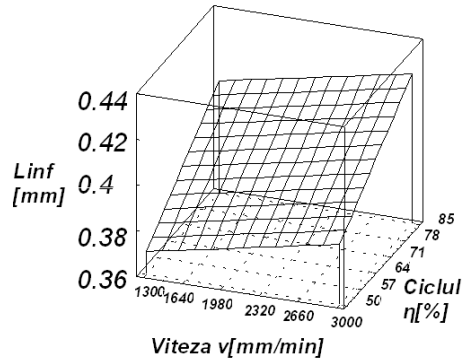


Figura 4.55. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și ciclu, E2

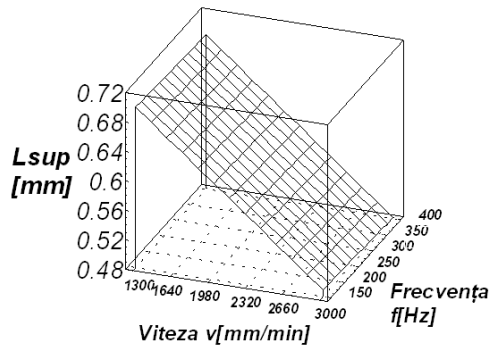


Figura 4.56. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și frecvență, E2

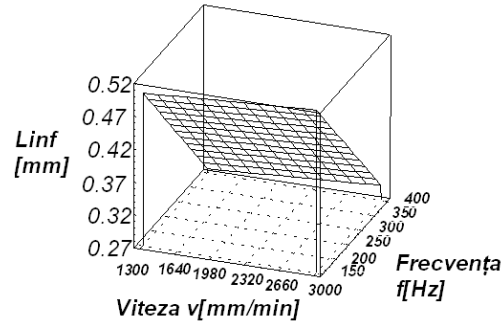


Figura 4.57. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și frecvență, E2

În figura 4.58., se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea superioară a materialului, în funcție de viteza de tăiere și presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la partea superioară scade puternic cu viteza de tăiere. Există o creștere slabă a lățimii tăieturii la partea superioară cu presiunea oxigenului. Se arată astfel că, cantitatea de topitură crește cu creșterea presiunii oxigenului. De asemenea, cantitatea de topitură scade cu viteza de tăiere prin reducerea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material.

În figura 4.59., se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a materialului în funcție de viteza de tăiere și presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental, lățimea la partea inferioară a tăieturii se nesemnificativ. Se observă că aceasta crește puternic cu presiunea oxigenului și într-o mai mică măsură crește cu viteza de tăiere. Se arată că efectul presiunii oxigenului este mai puternic la partea inferioară a tăieturii. De asemenea, se arată că, condițiile care favorizează vaporizarea și mișcarea topiturii creează condițiile pentru eficientizarea reacției de oxidare. Efectul creșterii vitezei de tăiere este acela de a favoriza obținerea de topitură (deși într-o mică măsură) prin reducerea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material.

În figura 4.60., se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea superioară a materialului în funcție de ciclu și frecvență. Cei doi parametri contribuie la creșterea duratei de interacțiune dintre radiația laser și material. Variațiile pe domeniul experimental sunt foarte mici. Practic lățimea tăieturii nu se modifică. Variația duratei de interacțiune între radiația laser și material prin ciclu și frecvență nu produce efecte asupra lățimii tăieturii la partea superioară a piesei. Această variație se asociază cu efectul puternic asupra lățimii tăieturii la partea superioară dat de viteză și de putere.

În figura 4.61., este prezentată suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a materialului în funcție de ciclu și frecvență. Se observă că pe domeniul experimental, lățimea tăieturii la partea inferioară scade cu frecvența. Ciclul nu produce modificări ale lățimii tăieturii la partea inferioară a materialului. Se arată că în cazul dat, creșterea frecvenței favorizează vaporizarea și scade cantitatea de topitură.

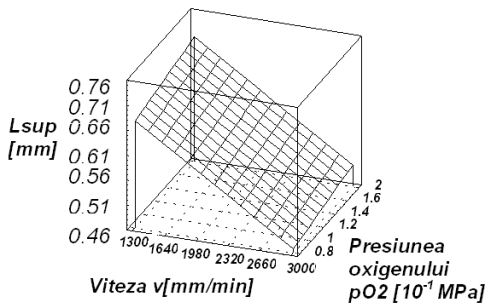


Figura 4.58. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de viteză și presiunea oxigenului, E2

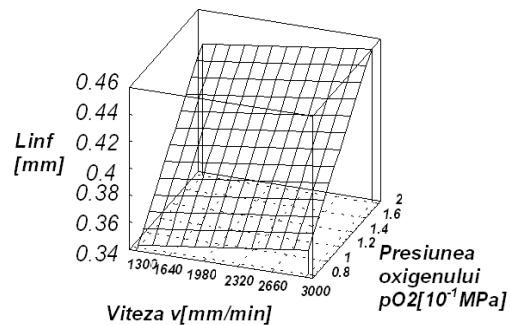


Figura 4.59. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de viteză și presiunea oxigenului, E2

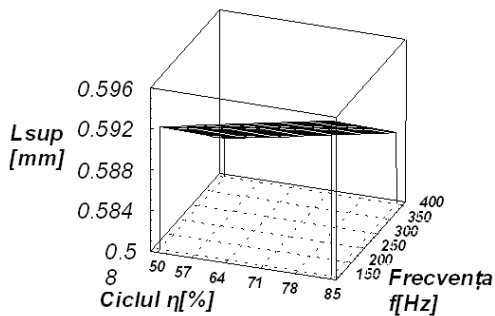


Figura 4.60. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de ciclu și frecvență, E2

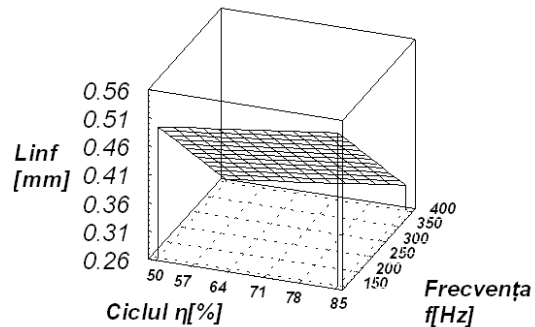


Figura 4.61. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de ciclu și frecvență, E2

În figura 4.62., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea superioară a materialului funcție de ciclu și presiunea oxigenului. Se observă că variația prezentată a lățimii tăieturii la suprafață este redusă pe domeniul experimental. Creșterea ciclului produce o mică creștere a lățimii tăieturii la suprafață. Presiunea oxigenului produce creșterea lățimii tăieturii la partea

superioară a piesei. Această creștere este redusă, însă arată favorizarea obținerii de topitură cu creșterea presiunii oxigenului.

În figura 4.63., este prezentată suprafața de răspuns pentru modificări ale lățimii tăieturii la partea inferioară a materialului. Se observă că pe domeniul experimental, lățimea tăieturii la partea inferioară crește atât cu presiunea oxigenului cât și cu ciclul. Creșterea cu presiunea oxigenului este mai puternică. Se observă că presiunea oxigenului și ciclul au aceleași efecte atât la partea superioară a tăieturii cât și la partea inferioară. Se arată astfel că, în situația dată cei doi parametri pot fi asociați direct cu obținerea de topitură.

În figura 4.64. se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la suprafața superioară a materialului în funcție de frecvență și presiunea oxigenului. Se arată că pe domeniul experimental lățimea tăieturii la suprafața superioară crește cu presiunea oxigenului. Frecvența produce o ușoară scădere a lățimii tăieturii. Variațiile pe domeniul experimental sunt mici. Se arată că presiunea oxigenului crește cantitatea de topitură.

În figura 4.65., se prezintă suprafața de răspuns pentru modificarea lățimii tăieturii la partea inferioară a materialului funcție de frecvență și presiunea oxigenului. Se observă că lățimea tăieturii la partea inferioară crește cu presiunea oxigenului. Frecvența produce scăderea lățimii tăieturii pe domeniul experimental. Se arată astfel că, creșterea frecvenței și a duratei de interacțiune între radiația laser și material favorizează vaporizarea. Se observă că variațiile cu frecvența și presiunea oxigenului sunt similare pentru lățimea tăieturii la partea superioară cu lățimea tăieturii la partea inferioară. La partea inferioară a materialului, aceste variații sunt mai puternice.

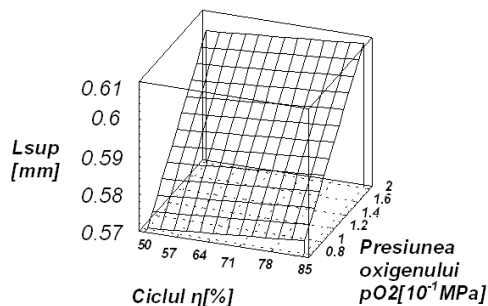


Figura 4. 62. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, funcție de ciclu și presiunea oxigenului, E2

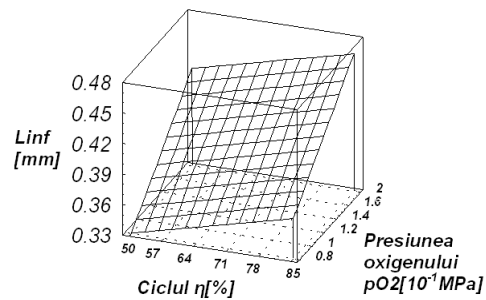


Figura 4.63. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii, funcție de ciclu și presiunea oxigenului, E2

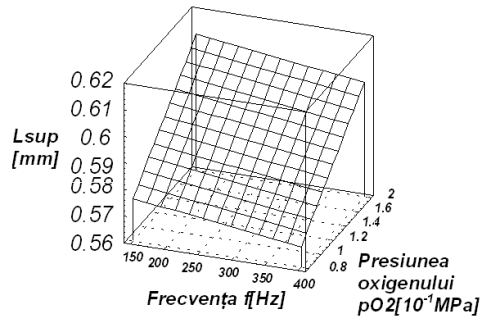


Figura 4.64. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea superioară funcție de frecvență și presiunea oxigenului, E2

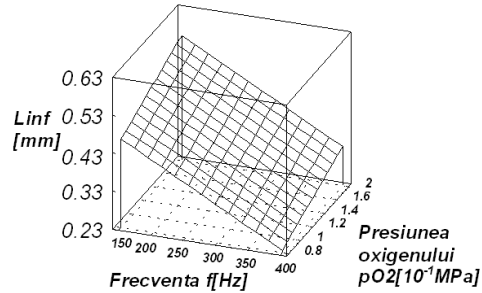


Figura 4.65. – Suprafața de răspuns pentru lățimea la partea inferioară funcție de frecvență și presiunea oxigenului, E2

Analiza suprafețelor de răspuns pentru experimentul factorial E2 a confirmat tipul de modificări observate la Diagramele PARETO. Chiar dacă unele modificări sunt mici, ele evidențiază fenomenele care se petrec în procesul de tăiere cu fascicul laser asistat de oxigen.

### 4.3. Eficiența la îndepărtarea materialului

Îndepărtarea materialului în procesul de decupare laser este considerată relativ la aria secțiunii tăieturii. Se definește eficiența la îndepărtarea materialului  $Q$  ca fiind raportul dintre energia liniară consumată în proces  $E_l$  și secțiunea prin tăietură  $A_s$ .

Se definește secțiunea tăieturii ca fiind lățimea la partea superioară a tăieturii  $L_s$ , respectiv, lățimea la partea inferioară a tăieturii  $L_i$ .

$$Q = \frac{\text{energia liniară}}{\text{secțiunea tăieturii}} = \frac{E_l}{A_s} = \frac{2}{(L_i + L_s)e} \cdot E_l = \frac{E_l}{L_m e} \left[ \frac{J}{\text{mm}^3} \right] \quad (4.1.)$$

unde  $e$  – grosimea tablei,  $e = 3\text{mm}$ .

Se consideră secțiunea tăieturii ca fiind sub forma unui trapez cu cele două baze date de mărimile direct măsurate. Eficiența la îndepărtarea materialului a fost calculată numai pentru tăieturile complet penetrate. Rezultatele pentru calculul acestei mărimi sunt trecute în tabelul 4.1.

Eficiența la îndepărtarea materialului caracterizează procesul de tăiere în raport cu parametrii modificați. Deși calculele au la bază valorile obținute în urma procesării tăieturii, eficiența ajută atunci când se dorește a se stabili nivelul energiei liniare pentru alte procese de decupare laser.

Din punct de vedere tehnologic, se urmărește situația în care eficiența la îndepărtarea materialului este minimă. Minimul de eficiență exprimă, în condițiile experimentale date, consumarea unei cantități de energie exprimate în  $J$  pentru îndepărtarea unui volum maxim de material exprimat în  $\text{mm}^3$ . Scăderea valorii eficienței poate fi asociată cu contribuția reacției de oxidare. Reacția de oxidare mărește aria secțiunii prin tăietură, fără a modifica energia liniară.

În cadrul seriei experimentale S1 (figura 4.66.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului, de presiunea oxigenului. Se observă că eficiența scade odată cu presiunea oxigenului și se obține un minim la 0,15 MPa, după care urmează creșterea eficienței. Scăderea eficienței arată creșterea contribuției reacției de oxidare odată cu creșterea presiunii. Aceasta se datorează aportului creșterii cantității de oxigen și îndepărtării oxizilor. La presiuni ridicate, îndepărtarea excesivă a materialului topit duce la creșterea eficienței. Pentru această serie experimentală dependența valorilor absolute obținute pentru eficiență, între punctele experimentale, este relativ mică. Astfel, se poate afirma că presiunea oxigenului în situația analizată nu modifică semnificativ eficiența la îndepărtarea materialului.

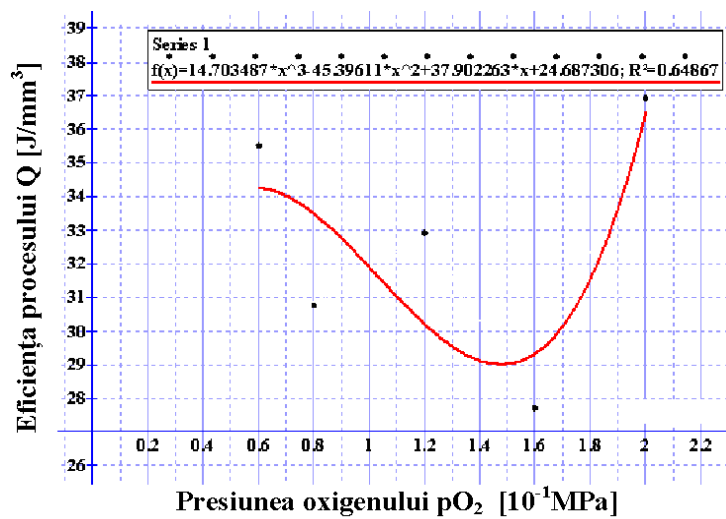


Figura 4.66. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de modificarea **presiunii oxigenului** la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm - S1

În cadrul seriei experimentale S2 (figura 4.67.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului funcție de puterea fasciculului laser. Se observă că eficiența la îndepărtarea materialului crește liniar cu puterea. Nivelul puterii (și prin aceasta intensitatea fasciculului laser) la suprafața piesei este astfel reglat încât să asigure vaporizarea materialului. Creșterea puterii fasciculului laser este direct proporțională cu intensificarea fenomenului de vaporizare, care reduce oxidarea materialului. Astfel se explică creșterea eficienței la îndepărtarea materialului cu puterea fasciculului laser.

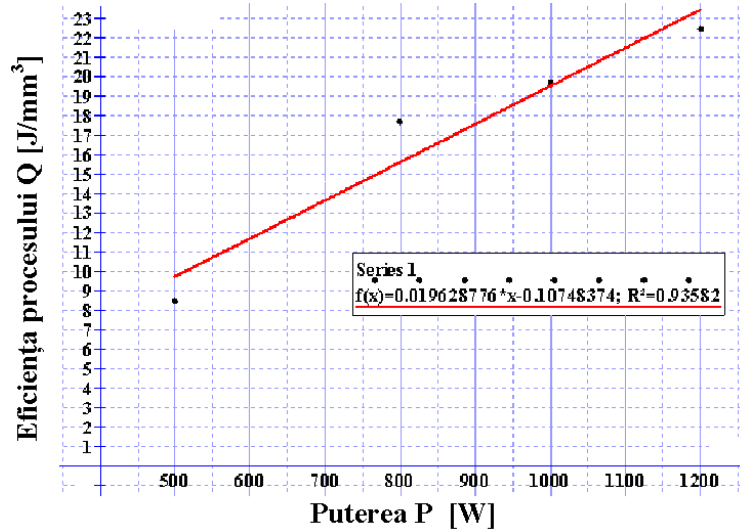


Figura 4.67. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de modificarea **puterii fasciculului laser** la  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %

$$f = 500 \text{ [Hz]} \quad pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} \text{ [MPa]} \quad ddp = 1 \text{ mm} - S2$$

În cadrul seriei experimentale S3 (figura 4.68.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului funcție de viteza de tăiere. Se constată că eficiența la îndepărtarea materialului scade odată cu viteza de tăiere. Deși creșterea vitezei de tăiere înseamnă reducerea iradierii prin reducerea timpului de interacțiune dintre radiația laser și material, cu o evoluție directă către realizarea tăieturii, tăieturile procesate la viteze de tăiere mari sunt mai eficiente energetic, decât cele procesate la viteze de tăiere reduse. Mai mult, scăderea eficienței la îndepărtarea materialului, în valori absolute, funcție de viteza de tăiere nu pare să fie limitată, ca scădere a eficienței în valori absolute.

În această situație se pune problema optimizării valorii vitezei de tăiere. Aceasta trebuie să fie:

- suficient de mică pentru ca materialul să fie penetrat și procesul de decupare să aibă loc;
- viteză de tăiere pe cât se poate de mare ca procesul de decupare să fie eficient.

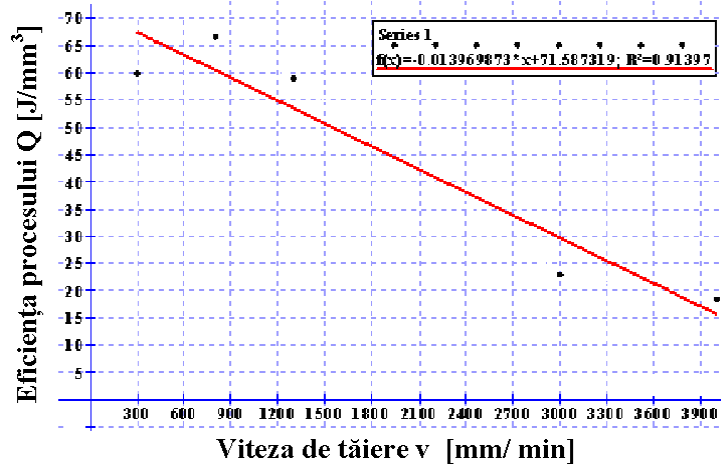


Figura 4.68. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului Q în funcție de modificarea **vitezei de tăiere** la  $P = 1500$  [W]  $\eta = 85\%$   $f = 500$  [Hz]

$$pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} \text{ [MPa]} \quad ddp = 1 \text{ mm} - S3$$

În cadrul seriei experimentale S4 (fig. 4.69.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului funcție de frecvență. Se observă că eficiența la îndepărtarea materialului crește liniar cu frecvența. Această creștere se explică prin sporirea duratei de interacțiune. Creșterea duratei de interacțiune defavorizează evident reacția de oxidare. Intervalul valorilor absolute ale dependenței eficiența la îndepărtarea materialului pe domeniul experimental, este redus. Se poate aprecia că frecvența influențează puțin eficiența la îndepărtarea materialului.

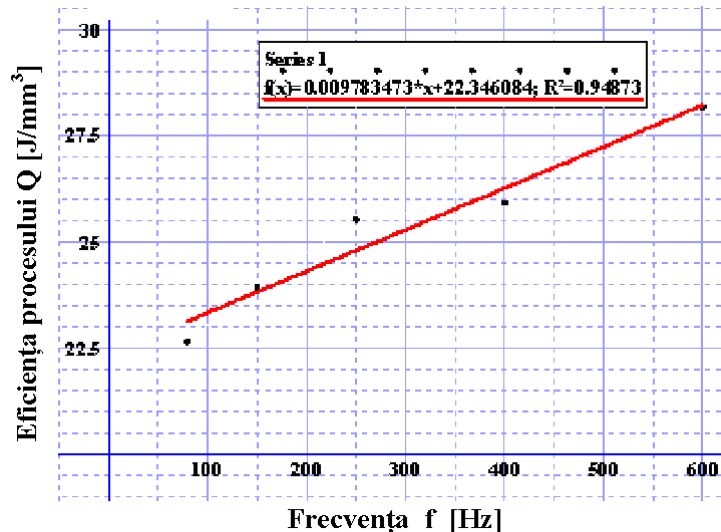


Figura 4.69. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului Q în funcție de modificarea **frecvenței de pulsare** la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]

$$\eta = 85\% \quad pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} \text{ [MPa]} \quad ddp = 1 \text{ mm} - S4$$



În cadrul seriei experimentale S5 (figura 4.70.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului în raport cu ciclul. Se constată că eficiența la îndepărtarea materialului crește liniar cu ciclul. Ciclul crește durata pulsului și prin urmare timpul de interacțiune. Mărirea duratei de interacțiune are un efect defavorabil pentru reacția de oxidare, prin aceasta explicându-se creșterea eficienței la îndepărtarea materialului.

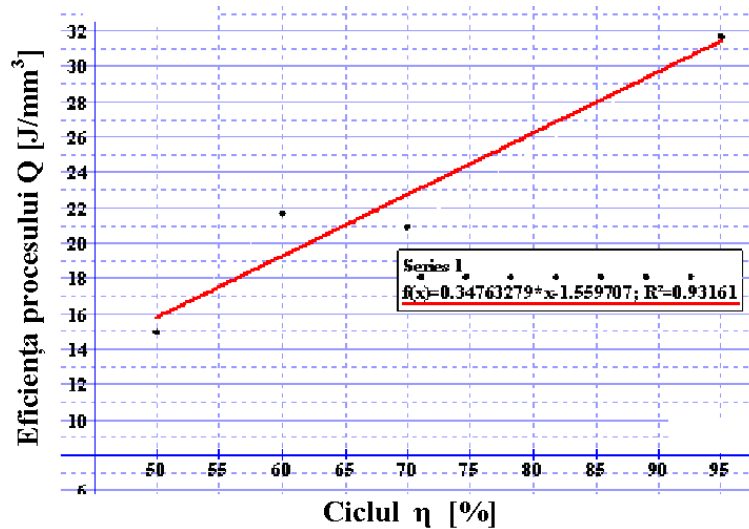


Figura 4.70. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de ciclul la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $ddp = 1$  mm - S5

Din analiza dependenței eficienței la îndepărtarea materialului cu modificările parametrilor în experimente s-a arătat că valori minime ale eficienței la îndepărtarea materialului se obțin odată cu creșterea presiunii oxigenului și creșterea vitezei de tăiere.

Ceilalți parametri care sporesc intensitatea la suprafața piesei, respectiv durata de interacțiune, are un efect defavorabil privind creșterea eficienței la îndepărtarea materialului. Eficiența la îndepărtarea materialului crește considerabil cu creșterea puterii fasciculului laser și a ciclului.

În cadrul seriei experimentale S11 (fig. 4.71.), este prezentată dependența eficienței la îndepărtarea materialului de presiunea oxigenului. Deosebirea esențială față de seria experimentală S1, este reducerea vitezei de tăiere. Ca și consecință, nivelul valorilor eficienței la îndepărtarea materialului crește, iar pe domeniul experimental apar variații mari. La presiuni mici apare o creștere care arată defavorizarea oxidării prin creșterea îndepărtării de material cu creșterea presiunii oxigenului.

Creșterea cantității de material topit îndepărtat prin creșterea presiunii oxigenului, este limitată și se obține un maxim. Scăderea bruscă și puternică a eficienței la îndepărtarea materialului care urmează acestui maxim, se datorează participării la ardere a materialului netopit aflat la temperatură ridicată. Eficiența la îndepărtarea materialului scade brusc având un minim sub  $20 J/mm^3$ . Durata mare de interacțiune între radiația laser și material face ca la începutul domeniului

experimental analizat, reacția de oxidare să aibă loc exclusiv în materialul topit. Îndepărtarea materialului topit face ca să intervină în reacția de oxidare și materialul netopit. Prin aceasta se explică scăderea eficienței la îndepărtarea materialului.

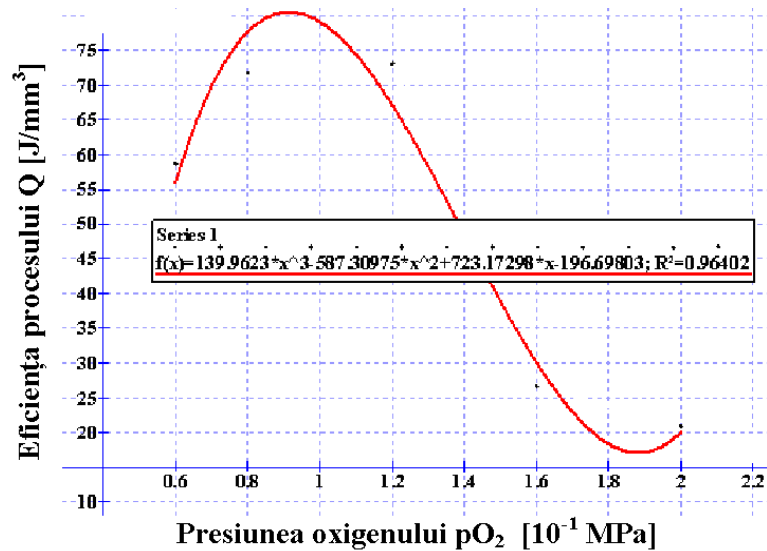


Figura 4.71. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de presiunea oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $\eta = 90$  %  $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm – S11

În cadrul seriei experimentale S12 (figura 4.72.), se prezintă dependența eficienței la îndepărtarea materialului de presiunea oxigenului. Față de seria experimentală S11, a scăzut puterea. Scăderea puterii compensează nivelul ridicat al duratei de interacțiune datorată vitezei de tăiere reduse. Dependența eficienței la îndepărtarea materialului analizată este astfel asemănătoare, cu dependența eficienței la îndepărtarea materialului din seria experimentală S1. Este de remarcă o creștere a eficienței urmată de un maxim și o ușoară scădere. Creșterea se datorează îndepărtării de material prin defavorizarea procesului de oxidare. Valorile absolute ale eficienței la îndepărtarea materialului sunt apropiate, astfel că variațiile prezentate nu au semnificație însemnată în cadrul seriei experimentale.

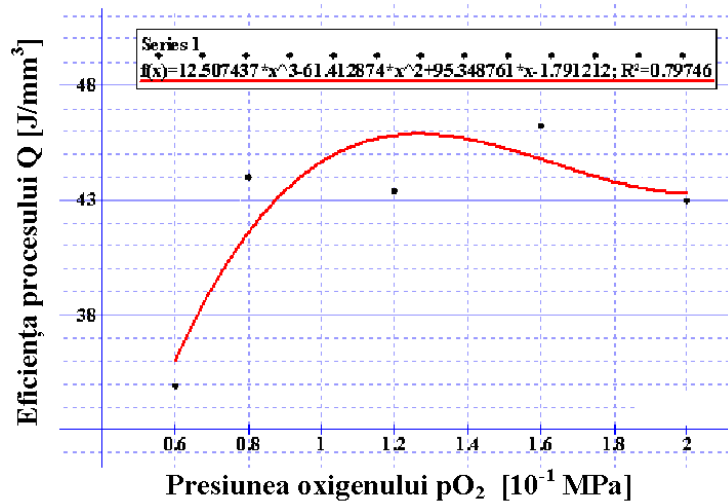


Figura 4.72. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de modificarea **presiunii oxigenului** la  $P = 700 [W]$   $v = 900 [mm/min]$   
 $\eta = 90 \%$   $f = 500 [Hz]$   $ddp = 1 mm - S12$

În cadrul seriei experimentale S13 (figura 4.73.), se prezintă dependența eficienței la îndepărtarea materialului de presiunea oxigenului. S-a utilizat un regim de iradiere cu pulsuri lungi de 25 ms astfel, durata de interacțiune a fost ridicată. Se observă o scădere logaritmică a eficienței la îndepărtarea materialului cu sporirea presiunii oxigenului. Aceasta poate fi interpretată direct prin creșterea contribuției reacției de oxidare odată cu creșterea presiunii oxigenului.

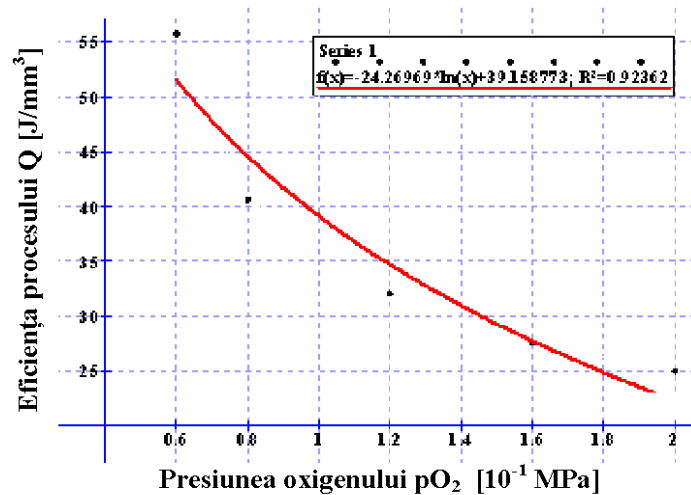


Figura 4.73. – Dependența eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de modificarea **presiunii oxigenului** la  $P = 700 [W]$   $v = 900 [mm/min]$   
 $\eta = 90 \%$   $f = 500 [Hz]$   $ddp = 1 mm - S13$

În cadrul seriei experimentale S14 (figura 4.74.), se prezintă dependența eficienței la îndepărtarea materialului de viteza de tăiere pentru pulsuri lungi și la presiuni ridicate. Se observă că eficiența la îndepărtarea materialului scade exponențial cu viteza de tăiere. Partea importantă a reprezentării grafice se remarcă prin scăderea vitezei de tăiere pe domeniul experimental. Aceasta este asociată cu dinamica reacției de oxidare, în condițiile în care apare o mare cantitate de topitură. Se observă că variația valorilor sunt mari. La începutul domeniului experimental se remarcă valori ridicate.

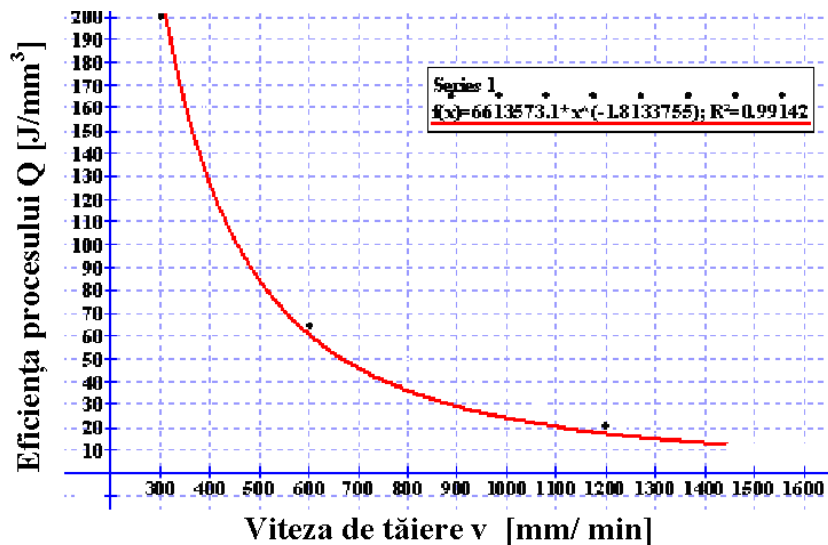


Figura 4.74. – Variația eficienței la îndepărtarea materialului Q în funcție de modificarea vitezei de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 50 \%$   $f = 20 [Hz]$

$$pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa] \quad ddp = 1 \text{ mm} - S14$$

În cadrul seriei experimentale S15 (fig. 4.75.), se prezintă dependența eficienței la îndepărtarea materialului funcție de viteza de tăiere, având ca diferențe față de seria experimentală S14, scăderea presiunii oxigenului. Utilizarea unui nivel mai scăzut al presiunii oxigenului duce la valori mai moderate pentru creșterea reacției de oxidare cu creșterea duratei de interacțiune.

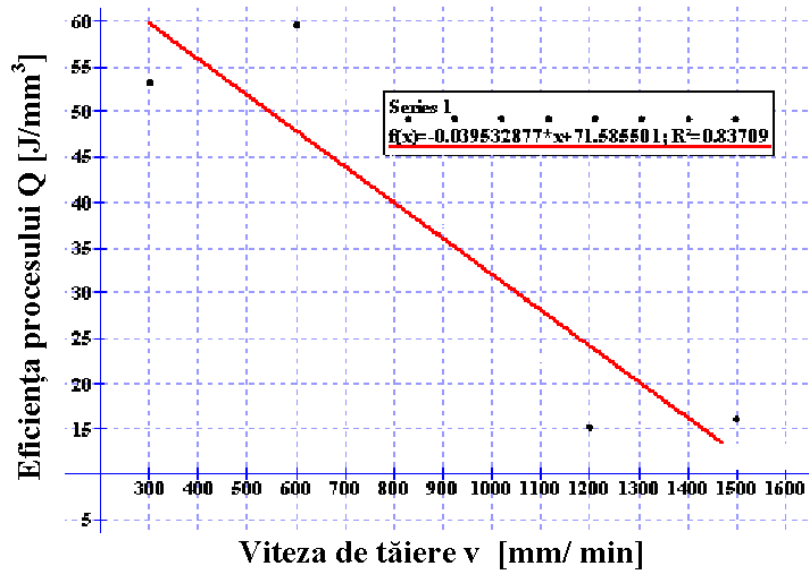


Figura 4.75. – Variația eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  în funcție de modificarea **vitezei de tăiere** la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 50 \%$   $f = 20 [Hz]$

$$pO_2 = 2 \times 10^{-1} [MPa] \quad dd_p = 1 \text{ mm} \quad - S15$$

#### 4.4. Definirea și analiza randamentului procesului $\epsilon$

În cele ce urmează se va analiza procesul de tăiere din punct de vedere energetic, folosind rezultatele experimentale obținute.

Se consideră că tăierea se produce continuu, procesul fiind stabil. Acesta este caracterizat de următoarele puteri:

- $P$  – puterea medie dată de fasciculul laser;
- $P_u$  – puterea utilă; puterea necesară pentru a asigura topirea materialului;
- $P_{in}$  – puterea necesară pentru asigurarea încălzirii necesare inițierii reacției de oxidare;
- $P_{out}$  – puterea rezultată în urma reacției de oxidare.

Ca ipoteze generale se consideră că forma tăieturii este menținută constantă pe parcursul procesului iar materialul este îndepărtat numai în stare topită și la temperatura de topire. Se neglijează îndepărtarea de material în stare de vapori. Procesul de tăiere se consideră uniform și stabil. Puterea medie  $P$  este cea reglată în experimente. Celelalte puteri se calculează ca raportul între energia produsă/consumată și durată. S-au considerat aceleași valori pentru densitatea materialului atât în faza solidă cât și în faza lichidă.

Pentru a aprecia corect zona în care are loc oxidarea, s-a considerat suprafața frontului de tăiere. Aceasta este puțin mai mare decât suprafața secțiunii prin tăietură. De asemenea, s-a considerat forma suprafeței frontului de eroziune ca fiind un trunchi de con, conform figurii 4.76.

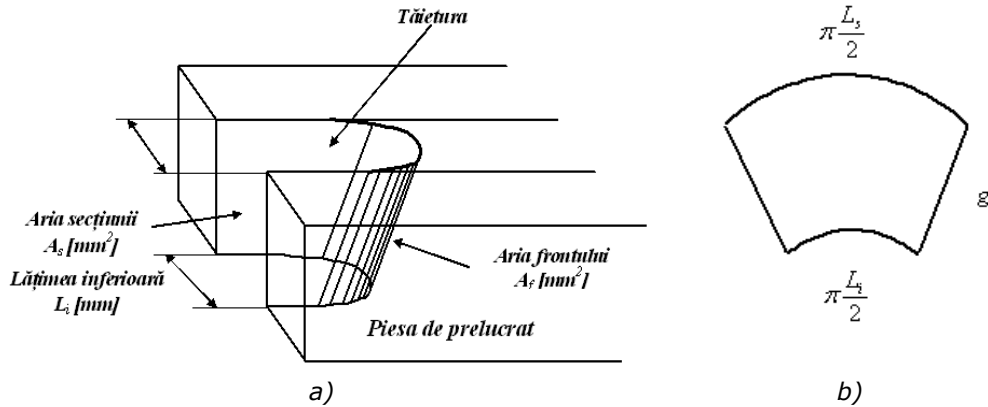


Figura 4.76. - Forma suprafeței frontului de eroziune  
 a) schema frontului de tăiere, b) desfășurarea suprafeței frontului de tăiere

Pentru această geometrie, aria frontului de tăiere se calculează astfel:

$$A_f = \frac{1}{2} \frac{L_s + L_i}{2} \pi \cdot g \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.2)$$

unde :

$$g = \sqrt{\left(\frac{L_s - L_i}{2}\right)^2 + e^2} \text{ [mm]} \quad (4.3.)$$

Aria desfășurată a frontului de tăiere este prezentată în figura 4.76. b).

Pentru aria secțiunii, se consideră forma unui trapez cu baza mică în jos. Aria secțiunii tăieturii este dată de relația:

$$A_s = \frac{L_s + L_i}{2} e = L_m \cdot e \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.4.)$$

Puterea utilă se determină cu relația:

$$P_u = \frac{\text{energia necesară topirii}}{\text{durată}} = \frac{\rho \cdot V \cdot L_0}{t} = \frac{\rho \cdot A_s \cdot t \cdot v \cdot L_0}{t} = \rho \cdot A_s \cdot v \cdot L_0 \text{ [W]} \quad (4.5.)$$

unde -  $\rho = 7,85 \text{ g/m}^3$ ,

-  $L_0$  - căldura necesară pentru a aduce materialul la temperatura de topire și pentru a topii materialul de procesat.

Pe baza unui raționament similar, se calculează puterea necesară inițierii reacției de oxidare.

$$P_{in} = \frac{\text{energia necesară pentru preîncalzire}}{\text{durată}} = \frac{\rho \cdot V \cdot L_{in}}{t} =$$

$$= \frac{\rho \cdot A_f \cdot t \cdot v \cdot L_{in}}{t} = \rho \cdot A_f \cdot v \cdot L_{in} [\text{W}] \quad (4.6.)$$

Încălzirea are loc la frontul de eroziune. Pentru a activa reacția de oxidare este necesară încălzirea materialului peste 1000°C. S-a considerat pentru  $L_{in}$  valoarea  $L_{in}=550\text{J/g}$

$$P_{iN} = \frac{\text{energia produsă în reacția de oxidare}}{\text{durată}} = \frac{\rho \cdot V \cdot L_{out}}{t} =$$

$$= \frac{\rho \cdot A_f \cdot t \cdot v \cdot L_{out}}{t} = \rho \cdot A_f \cdot v \cdot L_{out} \quad (4.7.)$$

Valoarea  $L_{out}$  a fost considerată:  $L_{out}=4600\text{J/g}$ .

Se definesc următoarele randamente ale procesului de tăiere:

a) **randamentul frontului de eroziune**  $\varepsilon_1$

$$\varepsilon_1 = \frac{\text{puterea utilizată la topirea materialului}}{\text{puterea dată de laser}} = \frac{P_u}{P} [\%] \quad (4.8.)$$

Randamentul frontului de eroziune urmărește obținerea de topitură în procesul de tăiere la iradierea cu fascicul laser, abstracție făcând de prezența reacției de oxidare. Randamentul  $\varepsilon_1$  poate avea valori supraunitare datorate tocmai prezenței reacției de oxidare.

b) **randamentul de inițiere a reacției de oxidare**  $\varepsilon_2$

$$\varepsilon_2 = \frac{\text{puterea necesară inițierii oxidării}}{\text{puterea dată de laser}} = \frac{P_{in}}{P} [\%] \quad (4.9.)$$

La definirea acestui raport s-a considerat că rolul fascicului laser este unul de inițiere a oxidării.

c) **randamentul general al procesului**  $\varepsilon_3$

$$\varepsilon_3 = \frac{\text{puterea utilizată la topirea materialului}}{\text{puterea dată de laser} + \text{puterea dată de oxidare}} [\%] \quad (4.10.)$$

Randamentul  $\varepsilon_3$  reprezintă randamentul procesului de tăiere luând în considerare atât energia dată de fasciculul laser cât și energia dată de reacția de oxidare.

Modificarea celor trei funcții anterior definite ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ ), cu parametri modificați în proces, este analizată în cele ce urmează. Se va urmări diferența dintre valorile funcțiilor  $\varepsilon_1$  și  $\varepsilon_3$ . Pentru toate seriile experimentale analizate s-a constatat că randamentul  $\varepsilon_1$  are valori mai mari decât  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ . Aceasta se datorează modului de calcul care ignoră reacția de oxidare. Astfel se evidențiază efectul oxidării. Se vor urmări modificarea relativă între  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ .

În cadrul seriei experimentale S1 (figura 4.77.), se prezintă dependența randamentului  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  de presiunea oxigenului. Se observă că pentru  $\varepsilon_1$  valorile sunt mai mari, însă și dependențele sunt mai mari. Se observă că randamentul pentru inițierea oxidării  $\varepsilon_2$  este mai mic decât cel al procesului. Variațiile pentru  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  sunt mai mici pe domeniul experimental, decât variațiile pentru  $\varepsilon_1$ .

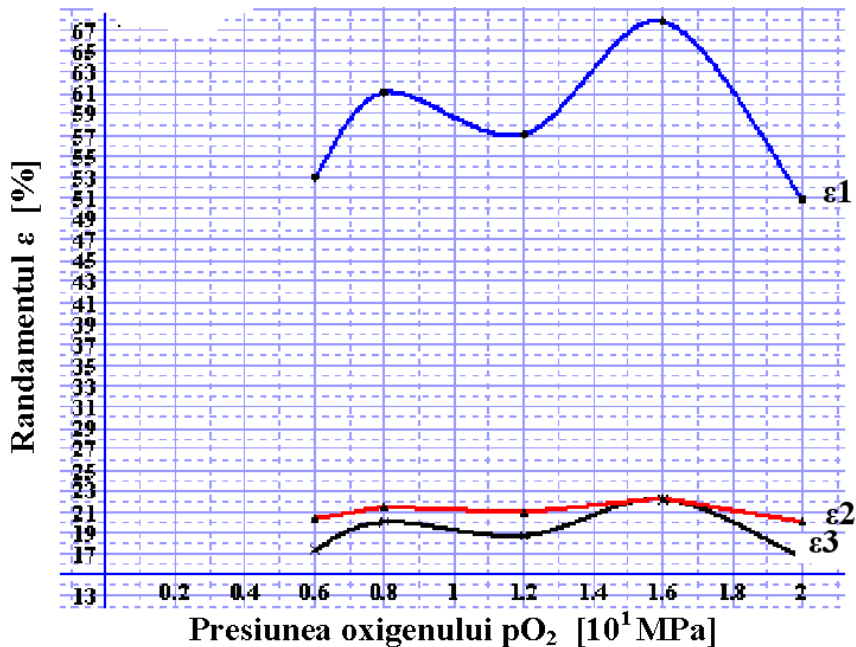


Figura 4.77. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea presiunii oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm - S1

Pentru situația analizată se observă că presiunea oxigenului nu produce variații semnificative ale celor trei randamente pe domeniul experimental.

În cadrul seriei experimentale S2 (figura 4.78.), se prezintă dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  de puterea fasciculului laser. Scăderea randamentului  $\varepsilon_1$  arată defavorizarea oxidării cu creșterea puterii fasciculului laser. Valorile ridicate ale lui  $\varepsilon_2$  arată că o mare parte din energia dată de fasciculul laser este consumată pentru a susține inițierea reacției de ardere a oxigenului. Randamentul general al procesului  $\varepsilon_3$ , este relativ ridicat și aproape constant pe domeniul experimental. Prin aceasta se arată că reacția de oxidare îndeplinește principalul rol la realizarea procesului de tăiere. Mai mult, randamentul  $\varepsilon_3$  prezintă o creștere ușoară cu puterea.



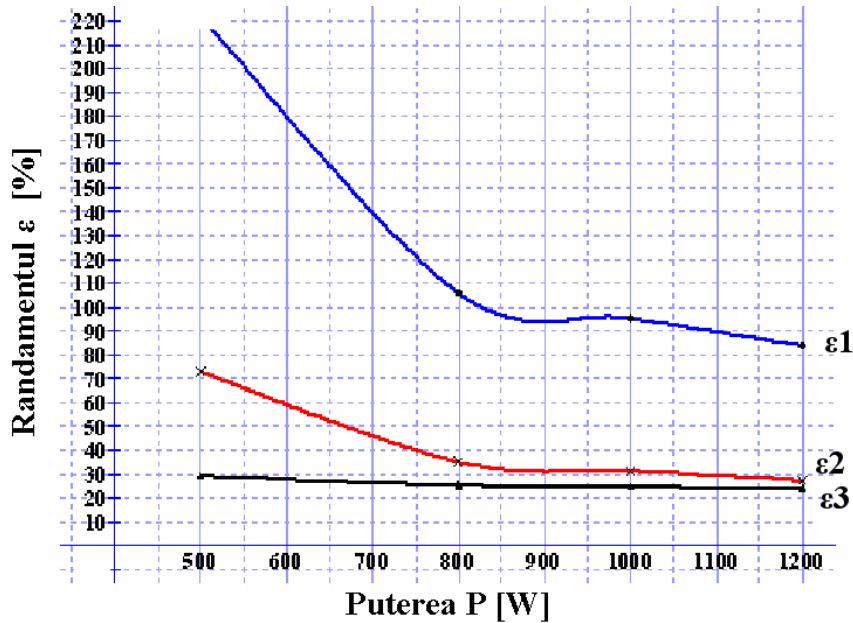


Figura 4.78. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea puterii la  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $ddp = 1$  mm - S2

În cadrul seriei experimentale S3 (figura 4.79.), se prezintă dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  de viteza de tăiere. Se observă că cele trei randamente cresc odată cu creșterea vitezei de tăiere. Aceasta se explică prin scăderea pierderilor prin conducție odată cu creșterea vitezei de tăiere. Se observă odată cu creșterea vitezei de tăiere  $\varepsilon_2$  crește mai rapid decât  $\varepsilon_3$ . Aceasta demonstrează că se consumă mai multă energie pentru inițierea oxidării. La începutul domeniului experimental, relativa apropiere între  $\varepsilon_1$  și  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ , arată că la viteze de tăiere scăzute evaporarea devine importantă.

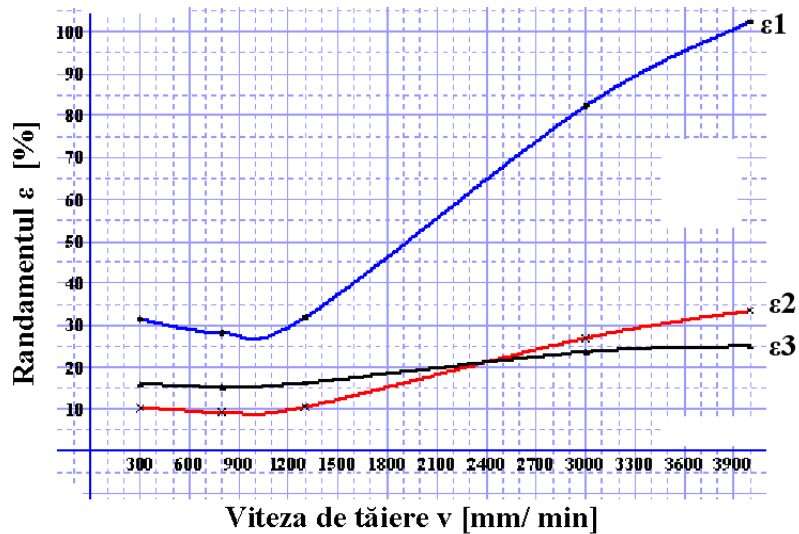


Figura 4.79. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea vitezei de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 85 \%$   $f = 500 [Hz]$   $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$   $ddp = 1 mm$  - S3

În cadrul seriei experimentale S4 (figura 4.80.), se prezintă dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  de frecvență. În general frecvența nu produce dependențe importante ale randamentelor. Se observă apropierea între  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ .

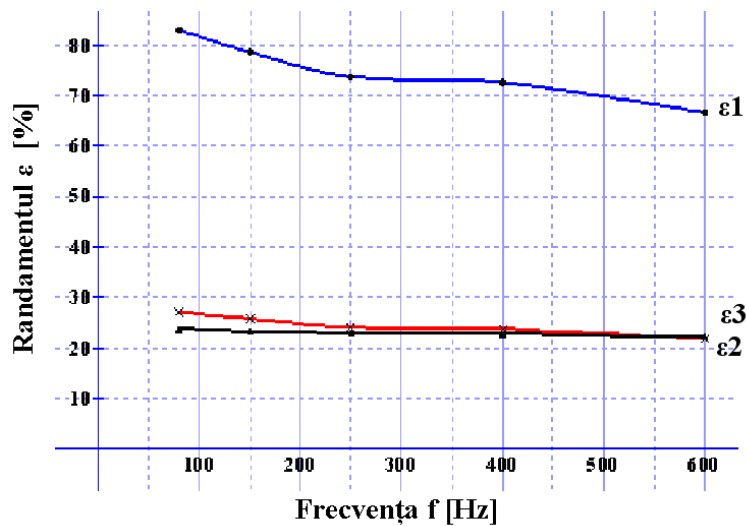


Figura 4.80. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea frecvenței de pulsare la  $P = 1500 [W]$   $v = 2500 [mm/min]$   $\eta = 85 \%$   $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$   $ddp = 1 mm$  - S4

În cadrul seriei experimentale S5, se prezintă dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  de ciclu (figura 4.81.). Se evidențiază o scădere a celor trei randamente cu creșterea ciclului. Prin aceasta se arată defavorizarea reacției de oxidare cu creșterea duratei pulsului. La valori mari ale ciclului randamentele  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  sunt apropiate.

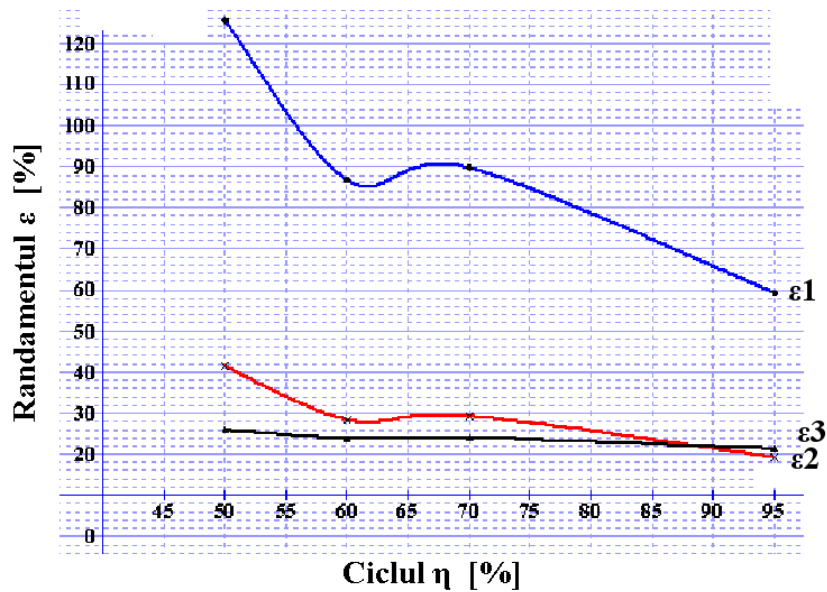


Figura 4.81. - Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea ciclului la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa]  $ddp = 1$  mm - S5

În figura 4.82., se prezintă variația randamentelor procesului de tăiere cu presiunea oxigenului în condițiile în care variază presiunea oxigenului la viteză de tăiere redusă. Se observă o creștere a randamentelor la presiuni mari. Aceasta urmează creșterii lățimii tăieturii. Se arată că randamentul  $\varepsilon_2$  pentru inițierea oxidării crește, în acest context. Randamentul procesului  $\varepsilon_3$  este în acest caz aproape constant pe domeniul experimental.

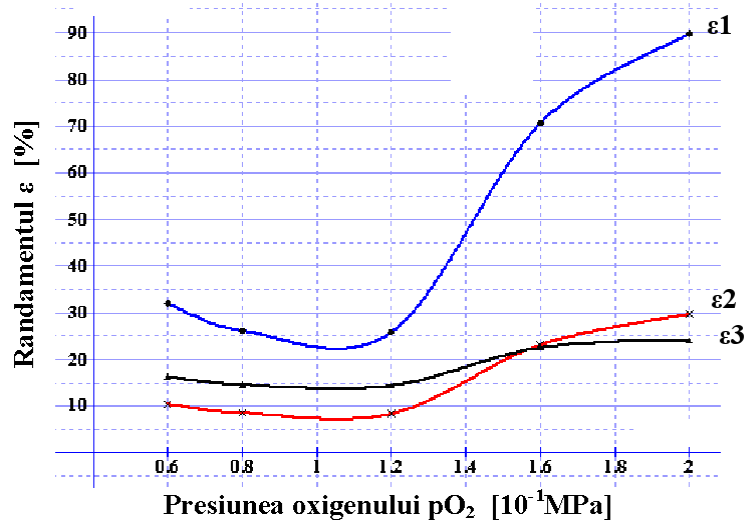


Figura 4.82. – Dependența randamentelor  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  și  $\epsilon_3$ , funcție de modificarea presiunii oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $\eta = 90\%$   
 $f = 500$  [Hz]  $ddp = 1$  mm – S11

În figura 4.83., se prezintă variația randamentelor  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  și  $\epsilon_3$  în funcție de presiunea oxigenului pentru cazul în care se folosește un nivel coborât atât pentru viteza de tăiere cât și pentru presiunea oxigenului. Se observă că variațiile sunt similare cu cele obținute pentru seria experimentală S1. Cele trei randamente au valori mai mari pentru presiuni mici ale oxigenului. Pentru  $\epsilon_1$  se observă unele variații. Acestea arată efectul oxidării care a fost exclus din calculul randamentului  $\epsilon_1$ .

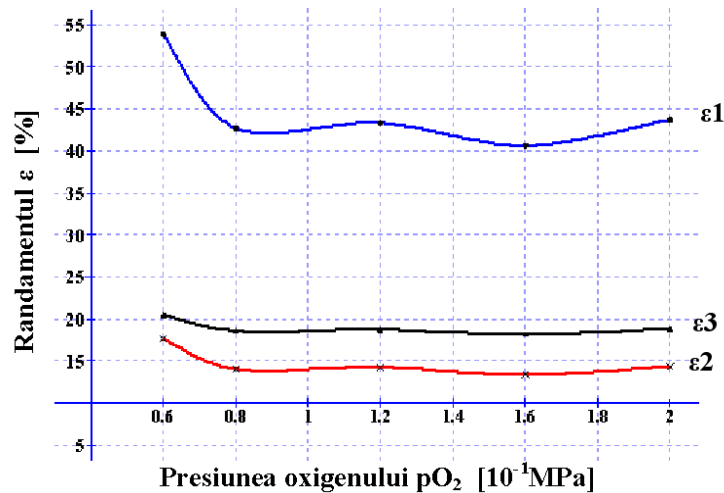


Figura 4.83. – Dependența randamentelor  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  și  $\epsilon_3$ , funcție de variația presiunii oxigenului la  $P = 700$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $\eta = 90\%$   $f = 500$  [Hz]  
 $ddp = 1$  mm – S12

În figura 4.84., se prezintă variația celor trei randamente  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  cu presiunea oxigenului. Se observă că pe domeniul experimental există o creștere a celor trei randamente cu presiunea oxigenului. Se observă că la sfârșitul domeniului experimental randamentul  $\varepsilon_2$  este mai mare decât randamentul procesului  $\varepsilon_3$ . Se arată că la presiuni ale oxigenului mici scade  $\varepsilon_2$ . Astfel reacția de oxidare este ușor întreținută datorită excesului de oxigen.

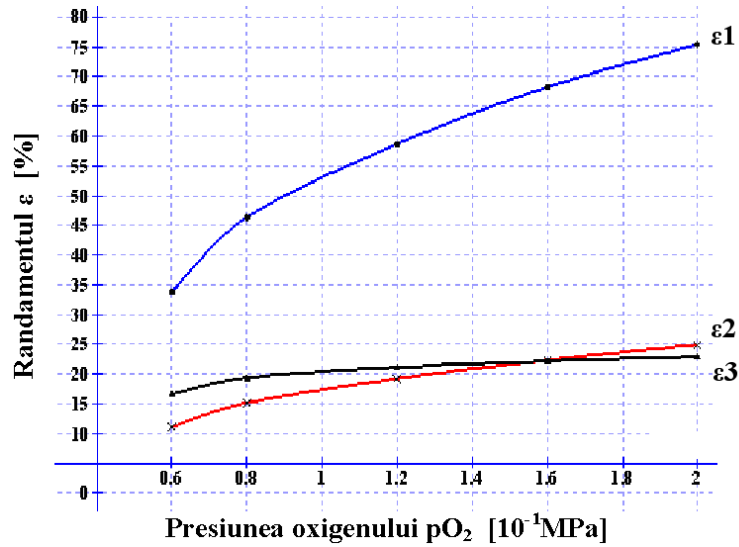


Figura 4.84. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție **de variația presiunii oxigenului** la  $P = 1500$  [W]  $v = 900$  [mm/min]  $\eta = 50$  %  $f = 20$  [Hz]  
 $ddp = 1$  mm – S13

În figura 4.85., se prezintă variația celor trei randamente  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  cu viteza de tăiere în situația în care timpul pulsului este lung și presiunea oxigenului scăzută. Se observă că există o creștere a celor trei randamente pe domeniul experimental. Totuși, pe domeniul experimental randamentul procesului  $\varepsilon_3$  menține o creștere liniară. La viteze de tăiere mari crește și partea din puterea laserului necesară inițierii reacției de oxidare.

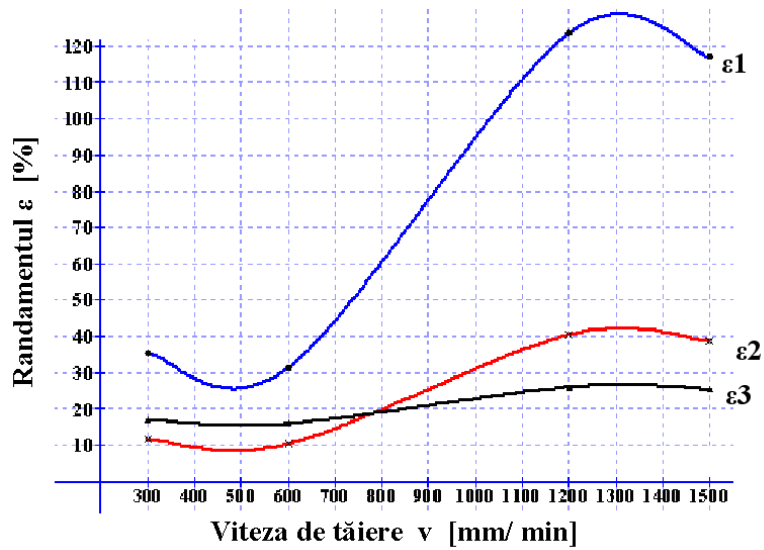


Figura 4.85. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea vitezei de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 50 \%$   $f = 20 [Hz]$

$$pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa] \quad ddp = 1 \text{ mm} - S14$$

În figura 4.86., se prezintă variația randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  cu viteza de tăiere pentru situația în care se folosesc durate mari ale pulsului și valori ridicate ale presiunii oxigenului. Se observă că cele trei randamente cresc cu viteze de tăiere mari. La aceasta, contribuția reacției de oxidare devine importantă.

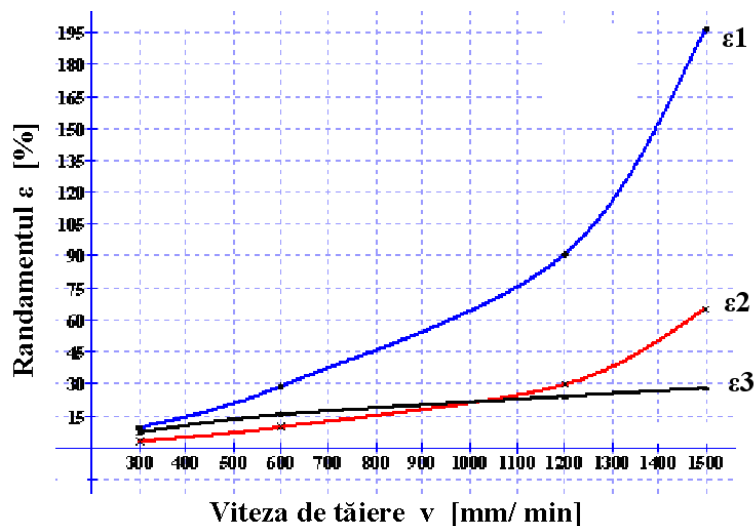


Figura 4.86. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea vitezei de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 50 \%$   $f = 20 [Hz]$   $pO_2 = 2 \times 10^{-1} [MPa]$

$$ddp = 1 \text{ mm} - S15$$

În cele ce urmează se va discuta interpretarea dependențelor eficiențelor pentru seriile experimentale la care s-a modificat poziția dintre diuză și piesă.

Pentru seria experimentală S6 (figura 4.86.), eficiența la îndepărtarea materialului este relativ constantă pe domeniul experimental pentru cele două cazuri. Ca observație generală, nivelul pentru cele trei randamente la  $ddp=2$  mm este mai mare decât cel al eficiențelor pentru cazul  $ddp=1$  mm. Situația poate fi legată direct de nivelul puterii pentru cazul  $ddp=2$  mm în situația în care efectul presiunii oxigenului este redus. Se arată că pe domeniul experimental randamentele variază nesemnificativ.

Pentru seria experimentală S8 (figura 4.87.), se prezintă dependențele celor trei randamente cu viteza de tăiere. Se observă că cele trei randamente cresc cu viteza de tăiere în ambele cazuri. Creșterea eficienței generale a procesului de tăiere  $\epsilon_1$  cu viteza, este o caracteristică comună pentru cele trei randamente. Se observă că aceste randamente sunt mai mari în cazul  $ddp=1$  mm. Se arată că scăderea intensității fasciculului laser la suprafața piesei în combinație cu creșterea vitezei de tăiere duce la creșterea celor trei randamente.

Pentru seria experimentală S9 (figura 4.88.), se prezintă variațiile celor trei randamente cu frecvența. Se arată că eficiențele în situațiile  $ddp=1$  mm și  $ddp=2$  mm, nu variază semnificativ cu eficiența pe domeniul experimental abordat. Se observă o scădere a celor trei randamente cu creșterea frecvenței.

Pentru seria experimentală S10 (figura 4.89.), se prezintă variația celor trei randamente cu ciclul. Se arată că cele trei randamente scad cu creșterea valorilor ciclului. Aceasta se datorează reducerii reacției de oxidare a materialului odată cu creșterea pulsului. Se observă că valori mai mari pentru cele trei se obțin în situația  $ddp=1$  mm.

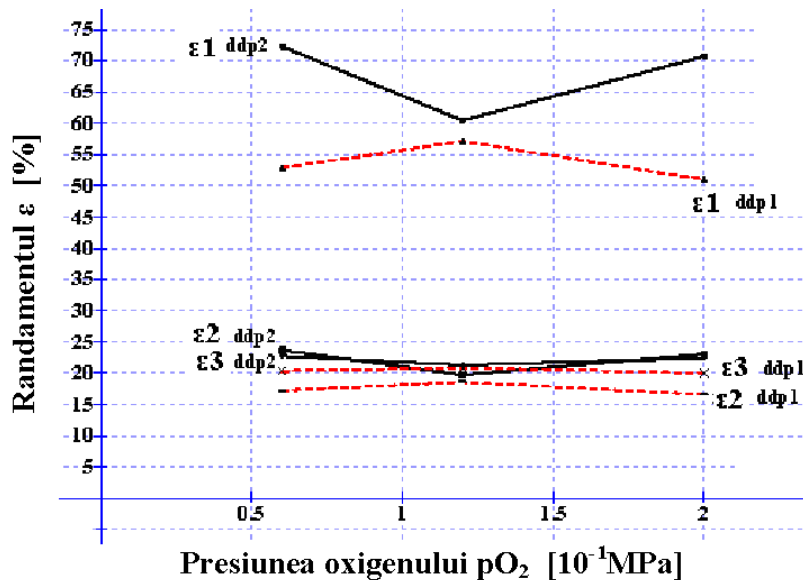


Figura 4.87. - Dependența randamentelor  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  și  $\epsilon_3$ , funcție de modificarea presiunii oxigenului la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $\eta = 85$  %  $f = 500$  [Hz] pentru  $ddp = 2$  mm, respectiv  $ddp = 1$  mm - S6

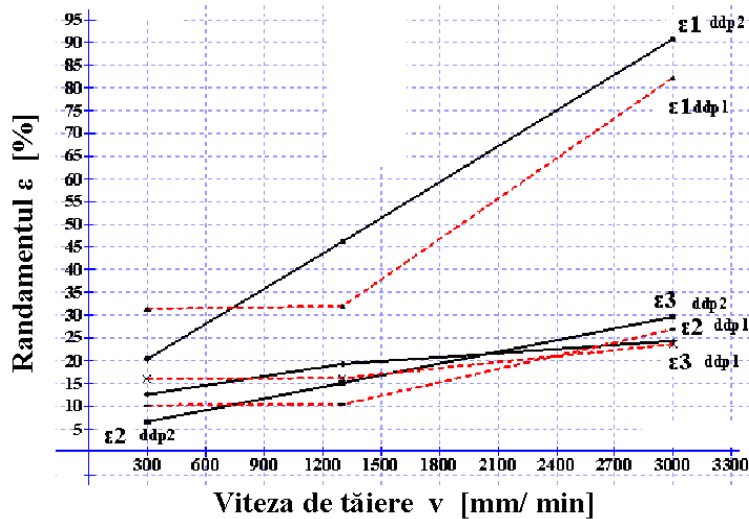


Figura 4.88. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea vitezei de tăiere la  $P = 1500 [W]$   $\eta = 85 \%$   $f = 500 [Hz]$

$pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$  pentru  $ddp = 2 \text{ mm}$ , respectiv  $ddp = 1 \text{ mm}$  – S8

În figura 4.90 se prezintă variația randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  cu ciclul. Se observă o scădere generală a acestora pe domeniul experimental. Pe întreg domeniul experimental valorile mai mari au fost obținute la  $ddp = 1 \text{ mm}$ . La valori mari ale ciclului randamentele se apropie pentru cele două cazuri cu o tendință inversare. Descreșterea valorilor celor trei randamente este mai mică la sfârșitul domeniului experimental.

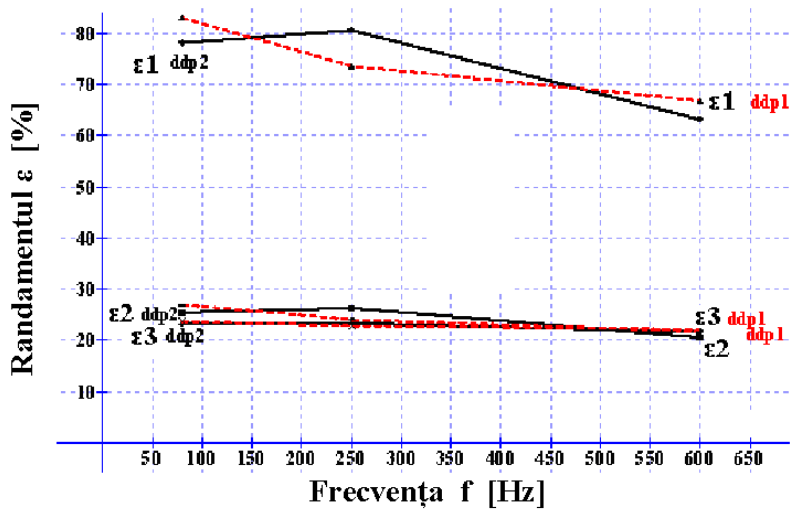


Figura 4.89. – Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de modificarea frecvenței de pulsare la  $P = 1500 [W]$   $v = 2500 [mm/min]$   $\eta = 85 \%$

$pO_2 = 0.8 \times 10^{-1} [MPa]$  pentru  $ddp = 2 \text{ mm}$ , respectiv  $ddp = 1 \text{ mm}$  – S9



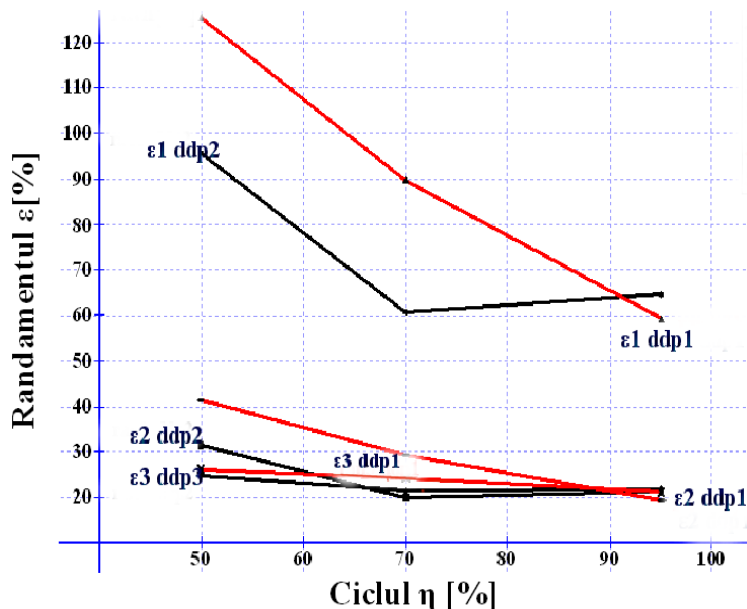


Figura 4.90. - Dependența randamentelor  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ , funcție de randamentul ciclului la  $P = 1500$  [W]  $v = 2500$  [mm/min]  $f = 500$  [Hz]  $pO_2 = 0.8 \times 10^{-1}$  [MPa] pentru  $ddp = 2$  mm respectiv  $ddp = 1$  mm - S10

Ca și concluzii generale, în urma analizei variației prezentate de seriile experimentale S6, S8, S9 și S10, se formulează următoarele:

1. schimbarea poziției diuzei de la  $ddp=1$  mm la  $ddp=2$  mm nu a modificat semnificativ nici tipul nici cauzele variației fiecărei eficiențe în parte. Nu s-a modificat nici eficiența procesului și nici eficiența de realizare a preîncălzirii materialului;

2. se poate remarca o ușoară favorizare a reacției de oxidare în cazul în care la  $ddp=2$  mm crește intensitatea la suprafața piesei, ceea ce favorizează creșterea cantității de topitură și prin urmare și reacția de oxidare a materialului.

#### 4.5. Analiza condițiilor în care procesul de decupare nu se realizează

Un punct important în analiza procesului de tăiere o reprezintă situația în care tăierea nu are loc. Tăieturile realizate cu laser prezintă un număr de situații în care sunt prinse sau cu depuneri de topitură la partea inferioară. Piese care prezintă astfel de situații pot fi desprinse mecanic prin lovire sau uneori cad sub propria greutate. S-a considerat ca și criteriu de identificare al tăieturilor nerealizate cele pentru care lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei nu a putut fi măsurată, adică situații în care nu a avut loc penetrarea materialului. Pentru a identifica cauzele pentru care tăietura nu se realizează trebuie considerații atât valorile parametrilor variați, cât și mărimile care caracterizează regimul de iradiere pulsant. În tabelul 4.5 sunt prezentate condițiile în care s-au obținut tăieturile nepenetrante.

Tabel 4.5. – Tabel cu rezultate și condiții experimentale la tăieturile nepenetrare

Tăietura	Puterea $P$ [W]	Viteza de tăiere $v$ [mm/ min]	Ciclul $\eta$ [%]	Frecvența $f$ [Hz]	Presiunea oxigenului $p_{O_2}$ [ $10^{-1}$ MPa]	Distanța diuză-piesă $ddp$ [mm]	Raportul $spo$ [-]	Putereade vârful $P_c$ [W]	Lățimea inferioară $L_i$ [mm]
6	300	2500	85	500	0.8	1	0.58	352	0
21	1500	2500	20	500	0.8	1	0.58	7500	0
29	300	2500	85	500	0.8	2	0.58	352	0
46	1500	3000	50	400	0.8	1	0.37	3000	0
48	1500	3000	50	150	0.8	1	-0.66	3000	0
61	800	3000	50	400	2	1	0.37	1600	0
62	800	3000	50	400	0.8	1	0.37	1600	0
63	800	3000	50	150	2	1	-0.66	1600	0
64	800	3000	50	150	0.8	1	-0.66	1600	0
71	800	1300	50	150	2	1	0.27	1600	0
80	1100	4000	75	250	1.4	1	-0.33	1466	0
81	1100	4000	75	250	1.4	1	-0.33	1466	0
87	1500	3000	50	150	0.8	2	-0.66	3000	0
115	1500	2500	50	20	0.8	1	-9.41	3000	0
120	1500	2500	50	20	2	1	-9.41	3000	0

• Tăieturile nr. 6. și 29. – Puterea este mult scăzută (de unde rezultă energie liniară scăzută) cu rezultat defavorabil pentru procesul de tăiere.

• Tăietura nr. 21. – Puterea de vârf este mult crescută de unde rezultă creșterea puternică a vaporizării cu rezultat defavorabil pentru procesul de tăiere. Însă și valoarea ciclului 20% poate fi considerată o cauză directă a eșuării procesului de tăiere.

• Tăieturile nr. 48. și 46. – Tăierea nu are loc datorită interacțiunii dintre viteza de tăiere ridicată (care înseamnă energie liniară scăzută) și puterea de vârf ridicată care conduce la o evaporare puternică.

• Tăieturile nr. 61, 62, 63 și 64. – Viteza de tăiere ridicată este principala cauză pentru care nu are loc tăierea. Energia liniară este relativ coborâtă. Aceasta este asociată cu valoarea pentru ciclu la 50%.

• Tăietura nr. 71. – Valoarea ciclului de 50 % asociată cu frecvența scăzută și cu presiunea oxigenului ridicată sunt cauzele eșecului procesului de tăiere.

• Tăieturile nr. 80 și 81. – Viteza de tăiere foarte ridicată (energie liniară mică) și valorile mici ale ciclului sunt cauzele eșecului tăierii.

• Tăietura nr. 87. – Cauzele eșecului tăierii sunt multiple. Pe de o parte, viteza de tăiere ridicată asociată cu ciclul de 50% iar pe de altă parte, puterea de vârf ridicată.

• Tăieturile nr. 115 și 120. – Raportul  $spo$  redus este principala cauză. Trebuie însă menționat și valoarea ciclului de 50% și a puterii de vârf ridicate care fiecare separat pot constitui cauze pentru eșecul procesului de tăiere.

Pentru eșecul procesului de tăiere se remarcă următoarele cauze:

- valoarea scăzută a ciclului 50% (sau sub această valoare) este cauza cea mai frecventă a eșecului procesului de tăiere;
- viteza de tăiere crescută 4000 mm/min;
- asocierea dintre viteza de tăiere de 3000 mm/min și ciclul de 50%;
- energie liniară mică (viteza de tăiere mare sau putere mică), numai pentru valori extrem de scăzute constituie o cauză evidentă independent de ceilalți parametri ai procesului;
- valorile ridicate ale puterii de vârf (consecință a mai multor parametri);
- valori negative și scăzute ale raportului *spo* (consecință a mai multor parametri).

#### 4.6. Concluzii

Capitolul 4 prezintă analiza rezultatelor experimentale care au ca obiect caracterizarea realizării și desfășurării procesului de tăiere. Rezultatele experimentale prezentate au ca punct comun măsurătorile realizate asupra lățimii tăieturii. Capitolul 4 este structurat pe două părți distincte:

- analiza directă a variației lățimii tăieturii la partea superioară și la partea inferioară a piesei;
- caracterizarea energetică a procesului de tăiere.

Lățimea tăieturii este o mărime care arată capacitatea fasciculului laser de a realiza tăieturii. Deși lățimea tăieturii nu are o semnificație din punct de vedere tehnologic aceasta este asociată cu realizarea procesului de tăiere și cu calitatea tăieturii.

Seriile experimentale prezintă variația lățimii tăieturii pe domeniul experimental pentru lățimea tăieturii la partea superioară a piesei, lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei și lățimea medie a tăieturii. Pentru aceste mărimi s-a realizat modelarea matematică a variațiilor cu funcții de regresie. Acest tip de modelare asigură punere în evidență a caracterului general al variației și compararea rezultatelor experimentale obținute cu cele ale unor cercetări similare. S-a urmărit ca funcțiile de regresie prezentate să aibă un coeficient de corelație cât mai ridicat și nu s-a urmărit utilizarea strictă a unui anumit tip de funcție (liniară, pătratică etc.) Modelele matematice date de funcția de regresie pot fi utilizate direct pentru a face predicții asupra lățimii tăieturii. S-au realizat următoarele observații asupra variațiilor parametrilor:

- efectul presiunii oxigenului asupra lățimii tăieturii este mai redus decât acela al parametrilor care controlează iradierea. Există două tipuri de modificări observate. Creșterea lățimii tăieturii cu presiunea oxigenului respectiv lipsa unui efect important al presiunii oxigenului;
- lățimea tăieturii scade cu viteza de tăiere. Această scădere este una puternică de tip exponențial. Durata pulsului ridicată și viteze de tăiere reduse duc la producerea de modificări ale lățimii tăieturii;
- puterea fasciculului laser crește lățimea tăieturii.

Comparațiile între seriile experimentale pentru care s-a modificat distanța dintre diuză și piesă de la  $ddp=1\text{mm}$  la  $ddp=2\text{mm}$  au arătat că în al doilea caz nivelul intensității fasciculului laser la suprafața piesei a fost mai mare în al doilea caz. Deplasarea planului focal către suprafața piesei se manifestă printr-o creștere generală a valorilor lățimii tăieturii și prin scăderea efectelor produse de parametri care controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material.

Experimentarea de tip factorial a considerat variația simultană a cinci parametri cu două nivele fiecare. Punctul principal al acestei cercetări l-a constituit planul experimental factorial complet  $2^5$ . Experimentarea de tip factorial este asociată cu o prelucrare a datelor experimentale cu ajutorul programului STATGRAPHICS, care conține:

- modelarea matematică folosind modele pătratice;
- ierarhizarea efectelor prin diagrame PARETO;
- reprezentarea variațiilor prin metoda suprafețelor de răspuns;
- analiza statistică folosind metoda de analiză a variațiilor ANOVA.

Experimentările de tip factorial au arătat următoarele:

- interacțiunile între parametrii au rolul principal în stabilirea valorilor lățimii tăieturii;

- modificarea lățimii tăieturii cu parametrii variați poate fi corect interpretată numai dacă există o asocieră între variația parametrului respectiv și o transformare de fază (topire sau vaporizare) care este favorizată de parametrul considerat;

- primul efect asupra lățimii tăieturii aparține parametrilor care controlează timpul de interacțiune între radiația laser și material. Între viteza de tăiere, frecvență și ciclu există o interschimbare, numai din acești parametrii având primul rol;

- puterea laserului are un efect important marcat ca al doilea efect;

- presiunea oxigenului provoacă același tip de efecte pentru lățimea tăieturii la partea superioară respectiv pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a tăieturii. Creșterea presiunii oxigenului produce creșterea lățimii tăieturii;

- parametrii care caracterizează iradierea au efecte diferite pentru lățimea tăieturii la partea superioară și pentru lățimea tăieturii la partea inferioară în funcție de transformarea de fază pe care o favorizează.

Următoarele probleme abordate în Capitolul 4, se referă la caracterizarea dinamici procesului de tăiere. Introducerea ipotezei că procesul de tăiere este stabil și că lățimea tăieturii măsurată (ca medie între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară, fiecare pentru trei situații diferite ale procesului de tăiere) este constantă pe parcursul realizării procesului permite caracterizarea energetică a procesului. Ipoteza introdusă nu ia în considerare neregularitățile micrometrice care apar pe suprafața tăieturii și instabilitățile din timpul procesului care apar pentru tăieturile late. Cercetare experimentală a fost aplicată numai pentru tăieturi care au fost complet penetrate. Ca temă principală a fost utilizat aspectul energetic al procesului de prin considerarea energiei implicate în proces și a puterii. Folosirea acestor mărimi este în acord cu ipotezele simplificatoare utilizate.

Eficiența la îndepărtarea materialului arată energia introdusă în iradierea cu fascicul laser necesară pentru realizarea îndepărtării unui volum de material din tăietură. Eficiența la îndepărtarea materialului este o caracteristică optimizabilă a procesului de tăiere. Valorile minime ale eficienței la îndepărtarea materialului din tăietură arată că consumul de energie pentru a îndepărta un volum dat de material. Pentru eficiența la îndepărtarea materialului s-au pus în evidență următoarele variații:

- scăderea valorilor eficienței la îndepărtarea materialului pe măsura creșterii vitezei de tăiere. Funcțiile de regresie utilizate au arătat mai multe tipuri de variație a eficienței la îndepărtarea materialului cu viteza de tăiere. Acestea au fost descreșteri de tip liniar, logaritm și pătratic. Descreșterea liniară cu viteza este dată de definiția eficienței la îndepărtarea materialului. Cazurile în care prin

creșterea este mai puternică reprezintă situații în care asupra procesului de tăiere laser se pot realiza optimizări;

- creșterea presiunii oxigenului asigură valori scăzute ale eficienței la îndepărtarea materialului. Acestea se prezintă sub forma unui minim la sfârșitul domeniului experimental.

Cazurile anterior enumerate reprezintă situații favorabile pentru desfășurarea procesului de tăiere laser. Situația defavorabilă pentru procesul de tăiere este aceea în care valorile eficienței la îndepărtarea materialului cresc. Creșteri puternice ale eficienței la îndepărtarea materialului pe domeniul experimental au fost înregistrate pentru creșterea puterii și ciclului.

Caracterizarea desfășurării procesului de tăiere a fost analizată prin introducerea a trei randamente ca rapoarte de puteri. Aceste funcții prezintă realități distincte deși sunt analizate simultan. Cele trei randamente au fost analizate pentru seriile experimentale clasice. Astfel introducerea randamentului  $\varepsilon_1$  compară puterea necesară realizării tăieturii prin topire cu puterea introdusă de fasciculul laser. Ignorarea puterii suplimentare date de reacția de oxidare face ca valorile randamentului  $\varepsilon_1$  să prezinte valori ridicate, uneori chiar supraunitare. Introducerea randamentului  $\varepsilon_2$  prezintă raportul dintre puterea necesară inițierii reacției de oxidare și puterea laserului. Principala observație asupra lui  $\varepsilon_2$  este aceea că în unele situații are valori mai mari decât cele ale randamentului general al procesului  $\varepsilon_3$ . Randamentul  $\varepsilon_3$  prezintă randamentul general al procesului, adică raportul dintre puterea necesară realizării tăieturii prin topire și suma dintre puterea laserului și puterea generată de reacția de oxidare. În general variația randamentului  $\varepsilon_3$  pe domeniul experimental a fost mică. Se remarcă că valorile randamentului procesului  $\varepsilon_3$  sunt apropiate de valoarea de 20 %. Apropierea generală între  $\varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$  arată că întreținerea reacției de oxidare pe întreg frontul de tăiere poate fi comparată din punct de vedere energetic cu procesul de tăiere pe ansamblul său.

Ultima problemă abordată în acest capitol este aceea a realizării procesului de tăiere. Sunt analizate în parte toate cazurile în care tăierea nu se realizează relativ la valorile parametrilor variați și relativ la mărimi care caracterizează iradierea în regim pulsant. Se arată că există o serie de condiții experimentale care pot fi ușor anticipate ca fiind defavorabile realizării procesului de tăiere.

Acestea sunt:

- putere scăzută;
- viteză de tăiere ridicată;
- valoarea scăzută a energiei liniare;
- valori scăzute ale raportului  $s_{po}$  (iradierea are loc în puncte separate).

Pe lângă acestea există și asocieri defavorabile între parametrii. Se remarcă în acest sens valorile mici ale ciclului și în special valoarea de 50%. Numărul tăieturilor care au fost nepenetrante a fost mic în raport cu volumul total al experimentului. Pentru tăieturile nepenetrante lățimea tăieturii (prin lățimea la partea superioară) are o semnificație diferită decât în cazul celor complet penetrate.

La tăieturile nepenetrante se remarcă o creștere excesivă a lățimii tăieturii la partea superioară. Depunerea topiturii în canalul realizat face ca adâncimea acestuia să fie măsurată astfel încât rezultatele obținute să fie utile.

Părți ale cercetării experimentale au fost prezentate de autor în lucrările [Glod, 2008], [Glod, 2009, a, b, c], [Glod 2010, a]. Cercetări experimentale asemănătoare au fost prezentate în lucrarea [Dubey, 2007].

## 5. VALUAREA CALITĂȚII TĂIETURILOR

### 5.1. Evaluarea secțiunii transversale și starea suprafețelor tăieturii

Secțiunea transversală prin tăietură este o caracteristică importantă a procesului de tăiere. Pentru tablele subțiri se folosește considerarea secțiunii transversale prin tăietură ca fiind sub formă de trapez. Relativ la această aproximare se remarcă cazurile în care lățimea tăieturii la suprafața piesei este mai mare și cazul în care lățimea tăieturii la partea inferioară este mai mare (figura 5.1.).

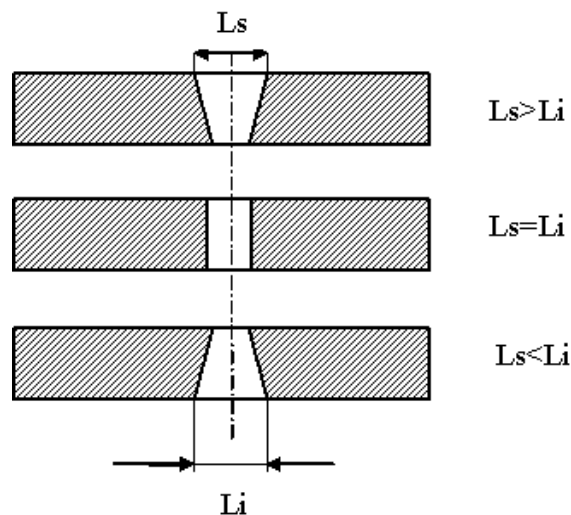


Figura 5.1. Forme ale secțiunii transversale prin tăietură pentru table subțiri

Din punct de vedere tehnologic se dorește obținerea tăieturilor cu suprafețe drepte. Caracterizarea tăieturii se realizează prin paralelismul suprafețelor. Paralelismul reprezintă înclinarea suprafeței tăieturii în raport cu suprafețele piesei. Paralelismul se exprimă printr-un raport adimensional s-au printr-un unghi. Există mai multe modalități de exprimare a paralelismului. Principalele elemente care intră în calculul paralelismului sunt lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea la partea inferioară și grosimea piesei. Exprimarea paralelismului sub forma unui unghi este legată de ipoteza că forma secțiunii este trapez, lucrul care nu ține cont de faptul că există variații ale lățimii tăieturii și neregularități micrometrice. Astfel se consideră că această modalitate de experimentare nu este potrivită. În experimentele realizate nu s-a variat grosimea materialului. Astfel aceasta nu a fost considerată în definirea raportului de paralelism.

Se consideră funcția de paralelism, aplicată pentru cazul când tăietura este mai lată la partea superioară ca fiind raportul dintre diferența celor două lățimi ale tăieturii și lățimea tăieturii la partea superioară.

$$R_{pal}(L_s, L_i) = \frac{L_s - L_i}{L_s} = 1 - \frac{L_i}{L_s} \quad (5.1.)$$

Raportul de paralelism „r” se definește ca fiind raportul între diferența între lățimea tăieturii la partea superioară a piesei și lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei și cea mai mare dintre cele două lățimi. Relativ la funcția de paralelism anterior introdusă raportul de paralelism este:

$$r = R_{pal}(L_s, L_i) \text{ dacă } L_s > L_i \text{ respectiv } r = R_{pal}(L_i, L_s) \text{ dacă } L_s < L_i \quad (5.2.)$$

Raportul „r” caracterizează paralelismul tăieturii fără a ține seama de grosimea piesei și fără a face distincție între partea superioară a piesei și partea inferioară a piesei. Se ține cont astfel că după despărțirea celor două piese tăiate la o viitoare utilizare a lor nu se poate face distincție între cele două părți ale piesei. Raportul de paralelism „r” are valoarea 0 pentru tăieturile perfect drepte și valoarea 1 pentru tăieturile nepenetrare. Deci, valorile acestuia sunt cuprinse în intervalul 0 – 1. Pentru tăieturile realizate valorile raportului „r” sunt prezentate în tabelul din anexa nr. 3.

Pentru valorile paralelismului „r” valoare cea mai mică obținută a fost 0,009. Reprezentări grafice ale variației raportului de paralelism „r” pentru seriile experimentale clasice sunt prezentate în figurile 5.1. – 5.5.

Modalitatea de calcul a raportului „r” a inclus două situații diferite: situația pentru care lățimea tăieturii la partea superioară este mai mare și situația în care lățimea tăieturii la partea inferioară este mai mare. Din această cauză, valorile raportului „r” nu pot fi considerate unitar. Ca problemă prioritară pentru analiza variațiilor raportului „r” s-a considerat creșterea sau descreșterea raportului „r”. S-a preferat o interpolare folosind funcții liniare care să arate creșterea sau descreșterea raportului „r”, chiar dacă coeficienții de corelație au uneori valori scăzute.

În figura 5.2., este prezentată variația raportului de paralelism pentru seriile experimentale unde s-a variat presiunea oxigenului. Pentru toate seriile experimentale analizate se observă o creștere a raportului paralelism pe domeniul experimental cu presiunea oxigenului. Variații mici ale raportului de paralelism pe domeniul experimental sunt observate pentru seriile experimentale S12 și S13. Acestea prezintă variații mai mari ale lățimii tăieturii decât celelalte serii experimentale. Se observă însă că forma tăieturii se menține aceeași pe domeniul experimental. Pentru seriile experimentale S1 și S13, care prezintă variații similare ale lățimii tăieturii, raportul de paralelism prezintă variații mai mari.

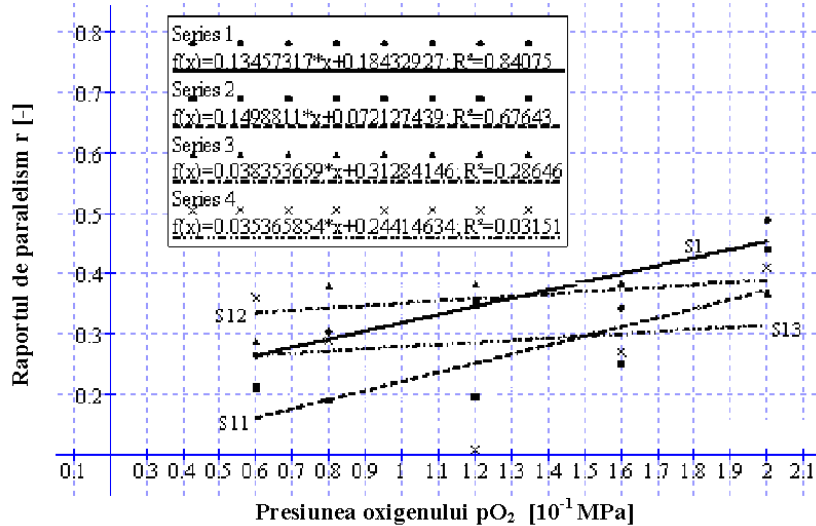


Figura 5.2. – Modificarea raportului de paralelism pentru seriile experimentale funcție de presiunea oxigenului.

Pentru aceste serii experimentale variațiile lățimii tăieturii au fost mai mici. Ca nivel al valorilor raportul „r” arată valori mai mari pentru S1 în comparație cu S11. Această diferență între valorile raportului de paralelism se explică prin valoarea ridicată a puterii pentru seria S1. Pe domeniul experimental se observă că valori ridicate ale raportului de paralelism se obțin și pentru S12. Se arată astfel că puterea ridicată (și prin urmare intensitatea) și durata pulsului (și prin urmare timpul de interacțiune dintre radiația laser și material) creează condițiile pentru creșterea raportului de paralelism. Pentru seriile experimentale prezentate valorile raportului de paralelism sunt relativ reduse. Astfel ele pot fi asociate cu tăieturi de calitate. Se arată totuși că, creșterea presiunii oxigenului reprezintă un factor potențial pentru deformarea secțiunii prin tăietură și prin aceasta scade calitatea tăieturii.

În figura 5.3., se prezintă modificarea raportului de paralelism cu puterea pentru seria experimentală S2. Se observă că pe domeniul experimental există o puternică scădere a raportului de paralelism cu puterea. Astfel, la puteri mici apar tăieturi cu secțiunea puternic deformată în timp ce pentru puteri mari se tinde către o secțiune a tăieturii dreaptă. Această comportare se explică prin pătrunderea frontului de vaporizare în material. Puterile mari asigură o penetrare mai mare a frontului de vaporizare în material. Pătrunderea frontului de vaporizare în material creează premisele pentru obținerea unor tăieturi cu muchii liniare.



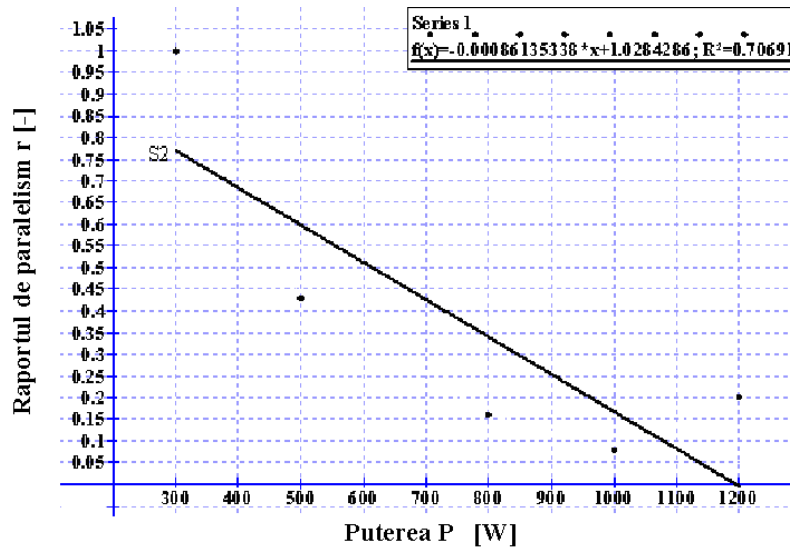


Figura 5.3. – Modificarea raportului de paralelism cu puterea, după S2

În figura 5.4., se prezintă variația raportului de paralelism pentru seriile experimentale unde s-a modificat viteza de tăiere pentru seria experimentală S3 unde timpul pulsului a fost mic. Se observă că raportul de paralelism „r” scade cu viteza de tăiere. Se observă că în acest caz se obțin tăieturi drepte, valorile absolute ale raportului de paralelism sunt relativ mici pe tot domeniul experimental. Pentru aceste valori a parametrilor se observă valori mici ale raportului de paralelism dar domeniul experimental exclude situația în care tăietura nu se realizează datorită creșterii vitezei de tăiere. Pentru seriile experimentale S14 și S15 se observă o creștere a valorilor raportului de paralelism pe domeniul experimental. Creșterea este rapidă și valorile raportului de paralelism sunt ridicate. Pe cale de consecință, condițiile experimentale în care se folosește un timp al pulsului ridicat sunt defavorabile pentru forma tăieturii. Tăietura se deformează pe măsura creșterii vitezei de tăiere până se obțin tăieturi nepenetrante.

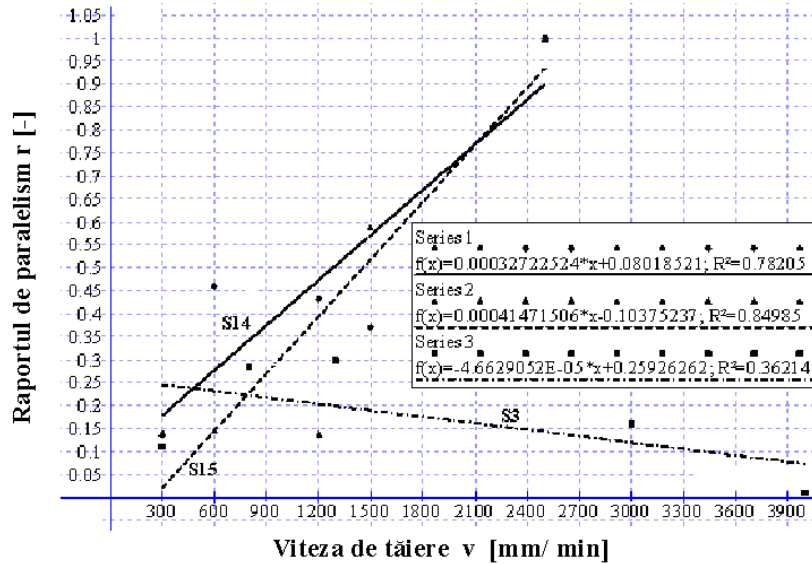


Figura 5.4. – Modificarea raportului de paralelism pentru seriile experimentale unde s-a modificat viteza de tăiere

Modificarea raportului de paralelism cu frecvența după seria experimentală S4 se prezintă în figura 5.5. Se observă că raportul de paralelism crește cu frecvența pe domeniul experimental. Pe domeniul experimental se obțin valori mici ale raportului de paralelism. În consecință, modificarea frecvenței nu degradează paralelismul suprafețelor tăieturii.

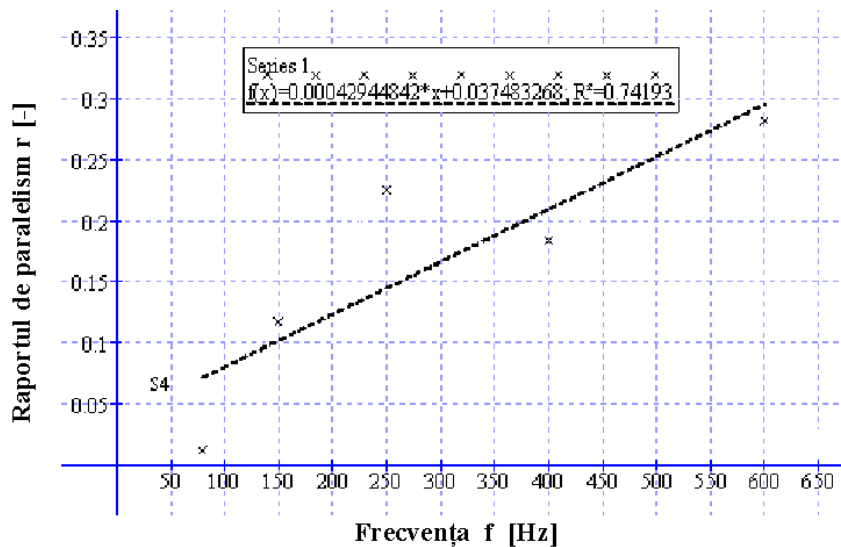


Figura 5.5. – Modificarea raportului de paralelism pentru seriile experimentale unde s-a modificat frecvența pulsurilor – S4

În figura 5.6., se prezintă modificarea raportului de paralelism cu ciclul după seria experimentală S5. Se evidențiază că pe domeniul experimental, raportul de paralelism scade cu ciclul. Se arată că valorile ridicate ale ciclului asigură suprafețe plane ale tăieturilor.

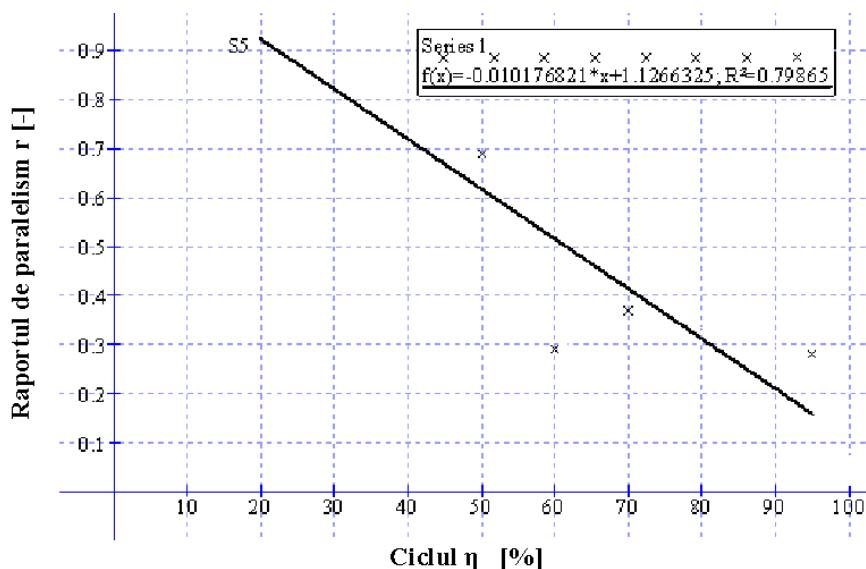


Figura 5.6. – Modificarea raportului de paralelism cu ciclul, după S5

Analiza modificării raportului de paralelism pe domeniul experimental a arătat că există tendința acestuia de a crește în condiții în care crește iradierea materialului prin timpul pulsului ridicat, prin viteza de tăiere redusă, prin puterea ridicată. Pentru a avea valori reduse ale raportului de paralelism este necesar a avea un reglaj al parametrilor care să mențină procesul de tăiere stabil. Se remarcă astfel necesitatea de a alege valori ridicate pentru ciclu pentru a avea suprafețe plane ale tăieturilor.

## 5.2. Evaluarea liniarității tăieturilor

Evaluarea liniarității tăieturii se referă la fenomene care apar de-a lungul tăieturii și care pot fi cauze de instabilitate. Tăieturile realizate cu laser prezintă neregularități micrometrice, oscilații la marginea tăieturii. Acestea există pentru toate tăieturile. Importantă este mărimea acestora în raport cu lățimea tăieturii. O schemă a tăieturii de-a lungul său este prezentată în figura 5.7.

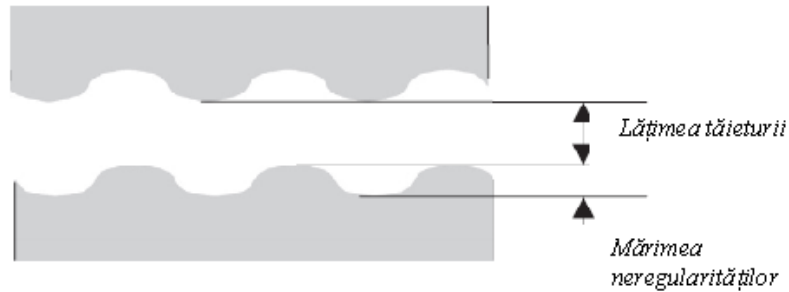


Figura 5.7. – Schema tăieturii

În urma experimentelor realizate pe o plajă largă de parametri tehnologici s-au obținut tăieturi, în mare majoritate complet penetrate, de o bună calitate. Tăieturile realizate sunt prezentate în anexa nr. 3. Foarte puține tăieturi au avut probleme la penetrarea inițială în material. Terminarea procesului fiind bruscă prin oprirea radiației nu a generat degradarea zonei. Au fost obținute tăieturi complet penetrate și de calitate prezentate în figura 5.8, dar și unele neadecvate calitativ, figura 5.9. Folosirea unui domeniu experimental larg a generat o serie de situații care pun de fapt în evidență toate situațiile care apar ca defecte în tăierea laser asistată de oxigen. O clasificare a acestor defecte în ordinea gravității lor este dată după cum urmează:

- mici bavuri formate din oxizi care se desprind ușor la mișcarea pieselor;
- punți de material topit care se rup ușor, însă există posibilitatea de a rămâne tăietură pe suprafața tăieturii;
- depuneri puternice de topitură la partea inferioară a piesei;
- depuneri de topitură cu împrăștierea de stropi și depuneri de jeturi de topitură sub formă de mustăți;
- realizarea tăieturii cu afectarea termică puternică a materialului, fără depunerea de topitură;
- depunerea de multă topitură la partea inferioară a piesei, cu posibilitatea de desprindere mecanică a acestora;
- variații puternice ale liniarității tăieturii prin oscilații mari, formă șerpuită;
- apariția de rupturi ale materialului și asimetrii puternice;
- lipsa de penetrare a tăieturii la partea inferioară, cu posibilitatea separării mecanice a pieselor
- umplerea totală sau parțială a tăieturii cu topitură;
- prezența de arsuri ale materialului, însoțite de subțierea și distrugerea acestuia;
- lipsa de penetrare a tăieturii.

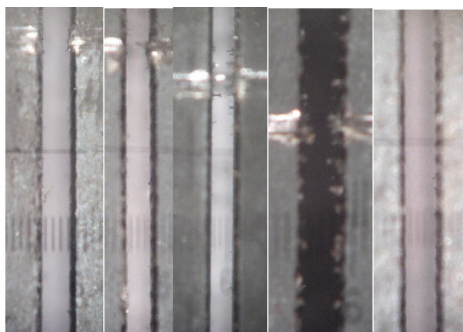


Figura 5.8.a) – Tăieturi bune, unele cu mici bavuri

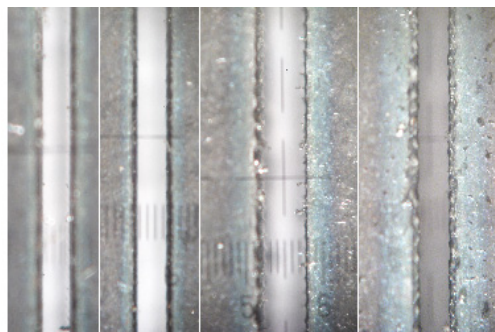


Figura 5.8.b) – Afectarea termică a materialului în zona tăieturii

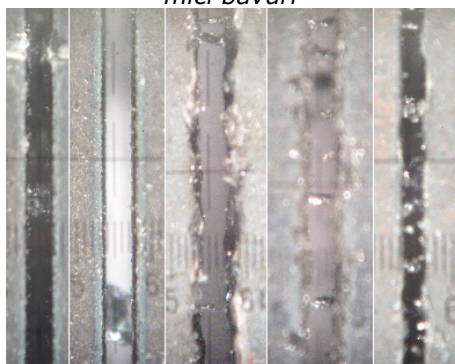


Figura 5.8.c) – Punți între cele două părți ale tăieturii

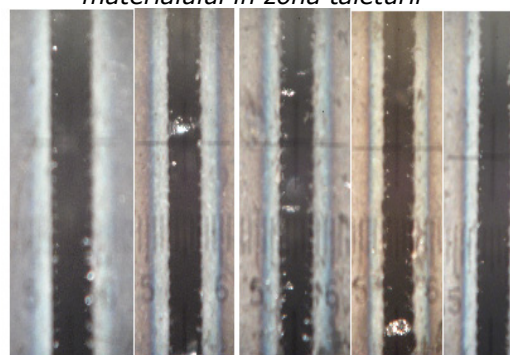


Figura 5.8.d) – Tăieturi cu afectare termică puternică

La partea inferioară a tăieturii în timpul procesului de tăiere, picăturile de metal topit au fost expandate de gaz formând bule care s-au spart în procesul de răcire. Acestea au condus la depunerea de pulbere de oxizi și metal care nu au aderat la material și s-au desprins ușor. Acest tip de bavuri nu se regăsește, deci, în produsul final. Alt tip de bavuri a fost reprezentat de curgeri ale topiturii. Acestea au generat tăieturi care au necesitat o ușoară acțiune mecanică pentru îndepărtarea pieselor.

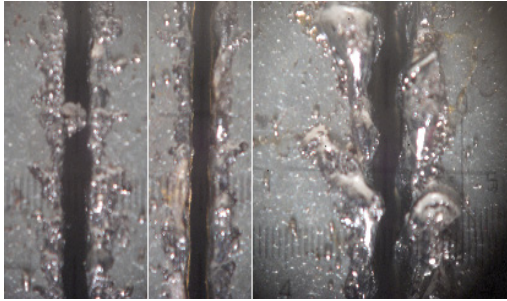


Figura 5.9.a) – Depunere de topitură la partea inferioară a piesei

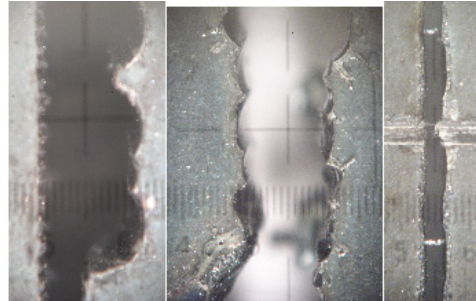


Figura 5.9.b) – Rupturi și asimetrii ale tăieturii

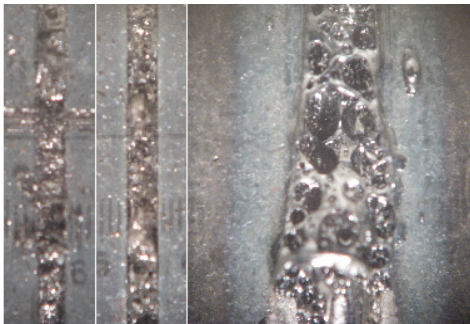


Figura 5.9.c) – Umplerea tăieturii cu topitură

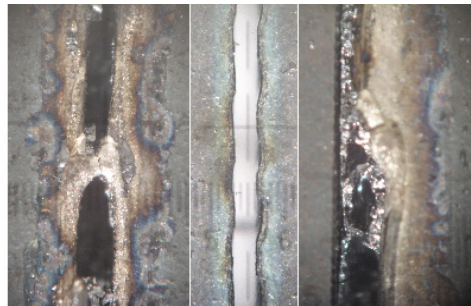


Figura 5.9.d) – Arsuri ale materialului

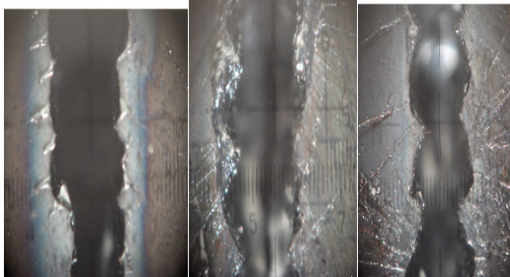


Figura 5.9.e) – Tăieturi care prezintă împrăștiere de jet de topitură

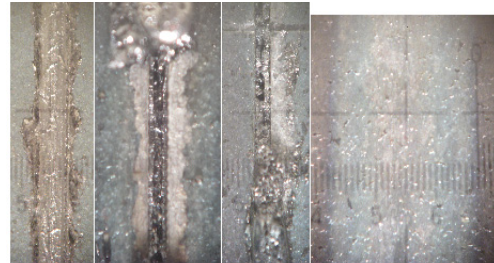


Figura 5.9.f) – Tăieturi nepenetrante, partea superioară a piesei, ultima imagine partea inferioară a piesei

Un aspect important îl constituie asocierea între fenomenele prezentate de tăieturi. Astfel împrăștierea de topitură și arsurile, afectările termice puternice se asociază cu rupturi și tăieturi late. Acestea nu se asociază cu depunerea de topitură. Depunerea de topitură se asociază cu tăieturi înguste. Se arată astfel că punctele de vedere exprimate în Capitolul 3 în legătură cu rolul intensității fascicului laser în selecția tipului de fenomene termice care apar sunt corecte.

Materialul depus prin topire are o structură poroasă ceea ce arată amestecarea acestuia cu gaz și oxizi. Chiar și cu această structură în unele cazuri îndepărtarea acestuia este dificilă.



Tabel 5.1.- Analiza încercărilor obținute în urma experimentelor realizate (Partea 1-a)

<b>Încercarea</b>	<b>Rezultatul analizei</b>
3	Nestrăpunsă, la început 1 cm
6	Nepenetrată și umplută
7	Multă topitură la partea inferioară
11	Afectată termic la ambele părți, după 3 cm tăierea are aspect de găurire neregulată
12	Tăietură lată
15	Probleme de penetrare la început 0.7 mm
21	Nepenetrată, umplută, arsă
22	Umplută la partea inferioară, penetrată și umplută
23	Bavuri, curgeri ale topiturii, aspect de găurire repetată regulată
24	Neregularități micrometrice mari, lată, aspect de găurire cu găuri mari repetate
27	În primii 0.5 cm probleme de penetrare
29	Nepenetrată, umplută la partea superioară
32	Arsă la partea superioară, bavuri și topitură cursă la partea inferioară, depuneri de topitură la partea inferioară
33	Slabe depuneri de topitură, la partea inferioară
38	Penetrată și umplută la partea inferioară
39	Probleme de penetrare la început 1,2 cm
44	Bavuri la partea inferioară. Curgerea topiturii pe primii 3 cm
45	Curgerea puternică a topiturii, bavuri mari la partea inferioară, aproape umplută
46	Nepenetrată, umplută la partea inferioară se observă o afectare puternică și o gaură la final
48	Nepenetrată, canelură semiumplută la partea superioară
51	Mărire a lățimii pe primul cm de început al tăieturii
54	Depuneri de topitură la partea inferioară, bavuri
56	Bavuri pronunțate la partea inferioară
57	Mici bavuri la partea inferioară
58	Bavuri, semi-închidere la partea inferioară
59	Bavuri, tăietură lățită
60	Nepenetrată
61	Nepenetrată, semiumplută
62	Nepenetrată, umplută, subțire
63	Nepenetrată, umplută
64	Nepenetrată, umplută, canelură vizibilă
71	Nepenetrată, afectată termic, semiumplută, aspect de canelură

Tabel 5.1. – Analiza încercărilor obținute în urma experimentelor realizate (Partea a 2-a)

<b>Încercarea</b>	<b>Rezultatul analizei</b>
72	Aspect de găurire repetată
78	Mici bavuri
79	Bavuri găurire pe alocuri
80	Afectată termic, nepenetrată
81	Afectată termic, nepenetrată
87	Nepenetrată, umplută
89	Mici bavuri, aspect de găurire
90	Depunere de topitură la partea inferioară
91	Depunere de topitură mai puternică și închisă la partea inferioară
92	Prezintă bavuri
99	Lată, aspect de găurire repetată, lățime variabilă
100	Lată, aspect de găurire repetată, lățime variabilă
106	Depunere de topitură și afectare termică puternică la partea inferioară, bavuri
107	Afectare termică la partea inferioară și la partea superioară după 5 cm de la începerea tăieturii, aspect de găurire repetată
108	Afectare termică pe ambele fețe, crește lățimea tăieturii după 2.5 cm, bavuri la partea inferioară
109	Găurire selectivă, probleme de îndepărtare a materialului la partea superioară
111	Lățime variabilă, material depus la partea inferioară
112	Mai mult material depus, formă uniformă a tăieturii, lățime variabilă, material depus la partea inferioară
113	Lată, aspect de găurire depunere puternică de topitură
114	Găurire repetată, topitură depusă la partea inferioară, semi-închisă nepenetrată, canelură, topitură la partea superioară
115	Nepenetrată, canelură, topitură la partea superioară
116	Arsă pe ambele părți, lățită la partea inferioară, afectată termic la 1 cm de la începerea procesului de tăiere
117	La 1,5 cm de la începerea procesului are loc un proces de găurire aleator
118	Lată, margini late, aspect de găurire repetată, arșă la suprafață, topitură la partea inferioară
119	Afectată termic pe ambele părți, aspect de găurire repetată, depunere constantă de topitură la partea inferioară
120	Nepenetrată, expulzare de topitură, canelură vizibilă la suprafață

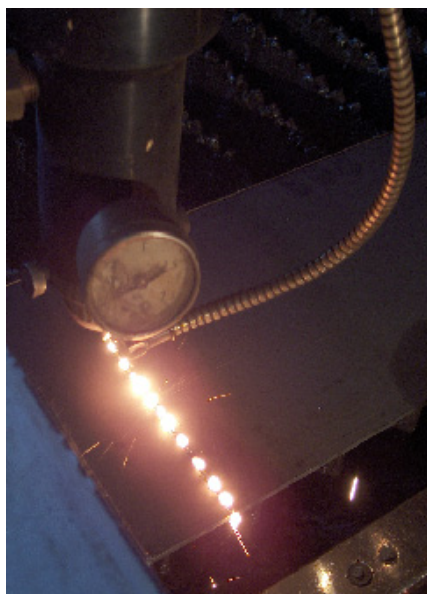


Cazul cel mai defavorabil a fost acela în care deși s-a obținut o tăietură, aceasta a fost umplută de topitură. Au fost tăieturi care au prezentat instabilitate, în sensul că s-au obținut variații ale dimensiunilor remarcate ca un efect de găurire repetată. Concomitent cu modificarea aleatoare a dimensiunilor tăieturii, s-au identificat fenomene de ardere a materialului prin colorarea specifică în albastru, fie la partea superioară fie la partea inferioară. O trecere în revistă a caracteristicilor tăieturilor obținute este prezentată în tabelul 5.1.

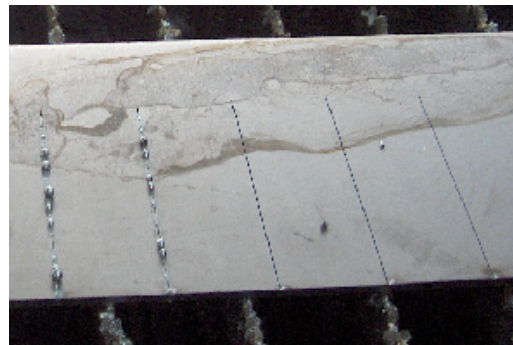
La anumite pachete de parametri tehnologici au fost semnalate fenomene de instabilitate a procesului, prin pătrunderi și tăieri aleatoare (figura 5.10).

Procesul de tăiere laser asistată de oxigen poate fi monitorizat. Mijloace de monitorizare avansate sunt analiza radiației emise din zona de interacțiune cu ajutorul unor fotodiode, captarea radiației din zona de interacțiune și analiza spectrală a acesteia, analiza sunetelor emise din zona de interacțiune. Pe lângă aceste analize care solicită prezența unor mijloace tehnice avansate se remarcă și unele mijloace tehnice elementare. Astfel este filmarea procesului de tăiere și analiza unghiului sub care sunt împrăștiate scântele la partea inferioară a piesei.

Pentru tăieturile realizate s-a efectuat filmări ale tăieturii. S-au observat scântele la partea inferioară a piesei. Pentru tăieturilor pentru care s-au folosit valori mari ale duratei pulsului (respectiv valori mici ale raportului  $spo$ ), s-au observat arderi spectaculoase. Acestea sunt prezentate în figura 5.10.



a) în proces



b) tăietura

Figura 5.10. – Instabilități în timpul procesului de tăiere

Se arată astfel că tăierea laser asistată de oxigen prezintă următoarele fenomene:

- îndepărtarea materialului se face sub formă topită, topitura este amestecată cu oxizi de fier care rămân sub formă de bavuri la partea inferioară a tăieturii și cad la desprinderea piesei;
- producerea unei cantități excesive de topitură face ca acesta să fie umflată sub formă de bule, care la răcire se transformă în pulbere;

- în condițiile de iradiere excesivă arderea continuă și după trecerea capului laser deasupra piesei;
- se remarcă prezența de scântei și depunerea de topitură la suprafața piesei.

Situațiile de instabilitate a procesului cu efectele prezentate au fost menționate anterior, fiind explicate detaliat.

### **5.3. Clasificarea și compararea suprafețelor tăieturilor**

Analiza suprafețelor tăieturilor a fost realizată într-un mod selectiv în sensul că au fost analizate numai tăieturile complet penetrate. Calitatea suprafețelor este dată de forma și numărul neregularităților micrometrice. Se remarcă următoarele fenomene care vor ajuta la compararea suprafețelor tăieturilor:

- existența unui singur tip de neregularități micrometrice pe toată adâncimea piesei;
- existența mai multor configurații de neregularități care se suprapun (oscilații) pe lungimea piesei;
- înclinarea neregularităților micrometrice.

Calitatea cea mai bună a suprafețelor tăieturilor se obține atunci când neregularitățile micrometrice sunt de un singur tip, drepte, pe toată profunzimea piesei și de mică amplitudine. Calitatea cea mai slabă a fost asociată cu suprafețele tăieturilor cu rupturi aleatoare. O analiză a neregularităților suprafețelor, cu măsurarea rugozității, a frecvenței neregularităților, are relevanță când este efectuată la suprafața piesei.

În cele ce urmează se prezintă o analiză a calității tăieturii pentru seriile experimentale clasice (figura 5.11. și 5.12.).

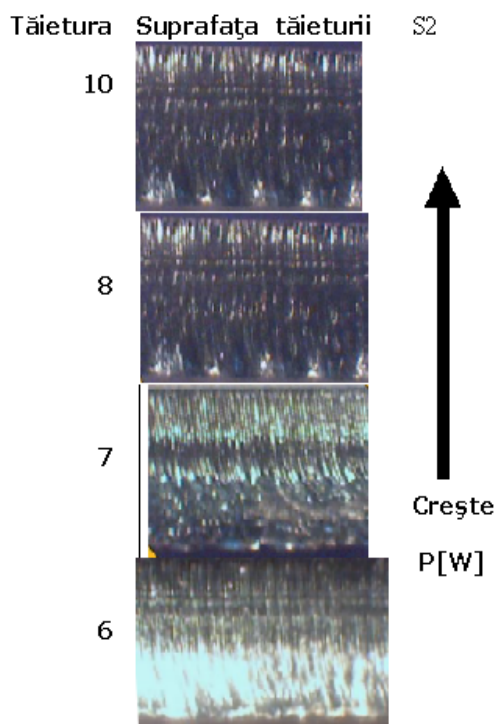


Figura 5.11. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S2

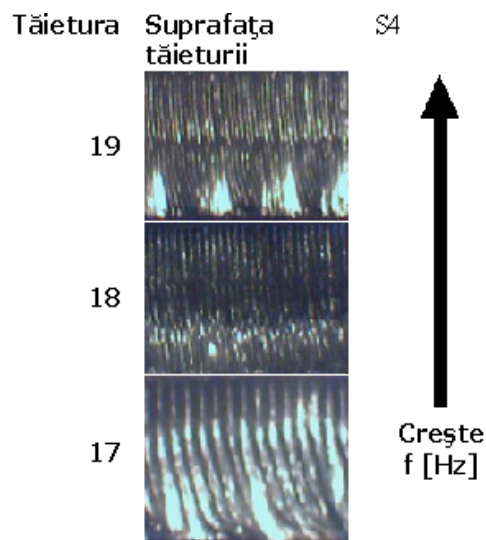


Figura 5.12. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S4

Pentru seria S2 (figura 5.11.), se observă că la puteri mici se obțin neregularități micrometrice fine, însă apare deformarea acestora la partea inferioară și formă neregulată. La puteri mari ale fasciculului laser, neregularitățile micrometrice se mențin drepte dar există o amplitudine mai mare la partea inferioară. Creșterea puterii fasciculului laser (în condiții experimentale ale seriei S1) arată că în acest caz puterea ridicată asigură o structură stabilă și reproductibilă a suprafeței.

Pentru seria experimentală S4 (figura 5.12.), se observă creșterea frecvenței neregularităților micrometrice odată cu creșterea frecvenței de pulsare. Fenomenul este asociat cu micșorarea neregularităților micrometrice, dar scade și rugozitatea suprafeței. La frecvența cea mai mare analizată la partea inferioară a piesei apar neregularități mari, alungite și extinse pe înălțime care formează de fapt, un alt tip de neregularităților micrometrice. La partea inferioară a piesei există tendința ca neregularitățile micrometrice să fie mai mari, aceasta înseamnă că frecvența lor scade iar rugozitatea suprafeței crește. Dacă acest lucru nu se întâmplă există tendința de a se forma la partea inferioară un nou tip de neregularități micrometrice. Imaginile suprafețelor după seria S4 arată înclinarea neregularităților micrometrice pe toată suprafața tăieturii la frecvență ridicată și numai la partea inferioară pentru cele la frecvență scăzută. Se susține astfel că, frecvența menține înclinarea neregularităților micrometrice dependente de viteza de tăiere.

La seria S5 (figura 5.13.), creșterea ciclului este echivalentă cu creșterea duratei pulsului la aceeași frecvență. Pentru valori mici se produc neregularități

micrometrice regulate, însă partea inferioară a tăieturii este afectată în unele locuri. Forma neregularităților micrometrice se deformează cu creșterea ciclului mai ales la partea inferioară. Comportarea este tipică unui aport energetic în exces. Tăieturile prezentate nu arată o calitate foarte bună.

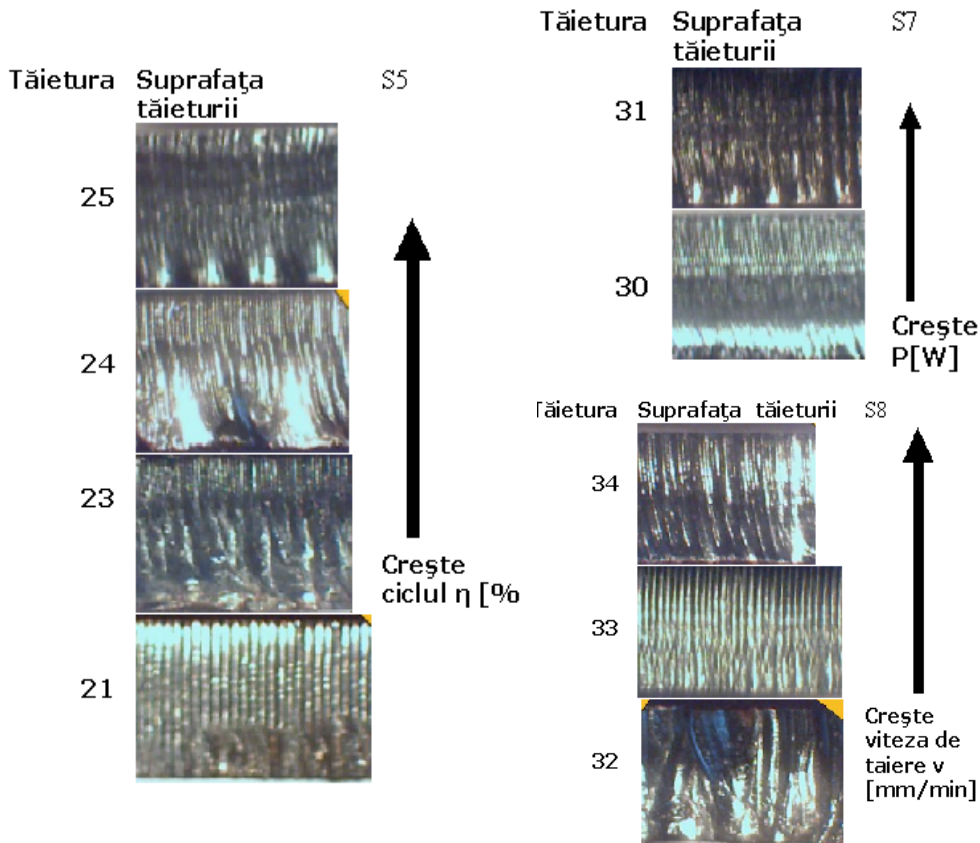


Figura 5.13. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S5

Figura 5.14. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S7 și S8

Pentru seriile S7 și S8 (figura 5.14.), aspectul suprafeței tăieturii se degradează cu creșterea puterii fasciculului laser. La putere scăzută se observă neregularităților micrometrice fine și înclinate iar la putere ridicată se observă neregularități micrometrice drepte însă de mai multe tipuri suprapuse, neregularităților micrometrice mici și neregularităților micrometrice mari și ridicături la partea inferioară a piesei.

Efectul datorat vitezei de tăiere asupra calității suprafeței este prezentat pentru seriile S7 și S8 (figura 5.14.). Viteza mică (tăietura 32) duce la prezența unei suprafețe neregulate. Creșterea vitezei duce la obținerea de neregularități micrometrice drepte și relativ regulate (tăietura 33). Viteza cea mai mare analizată arată neregularități micrometrice largi, chiar forme suprapuse înclinate.

Pentru seria S11 (figura 5.15.), se observă că forma neregularităților micrometrice se deformează pe măsura creșterii presiunii oxigenului. Puterea

scăzută și presiunea ridicată vor scădea calitatea suprafeței tăieturii. Pentru seria S12 (figura 5.16.), unde s-a folosit o putere ridicată a fasciculului laser, neregularitățile micrometrice sunt asemănătoare indiferent de presiunea oxigenului. Se observă o calitate bună a suprafeței tăieturii cu neregularități micrometrice drepte.

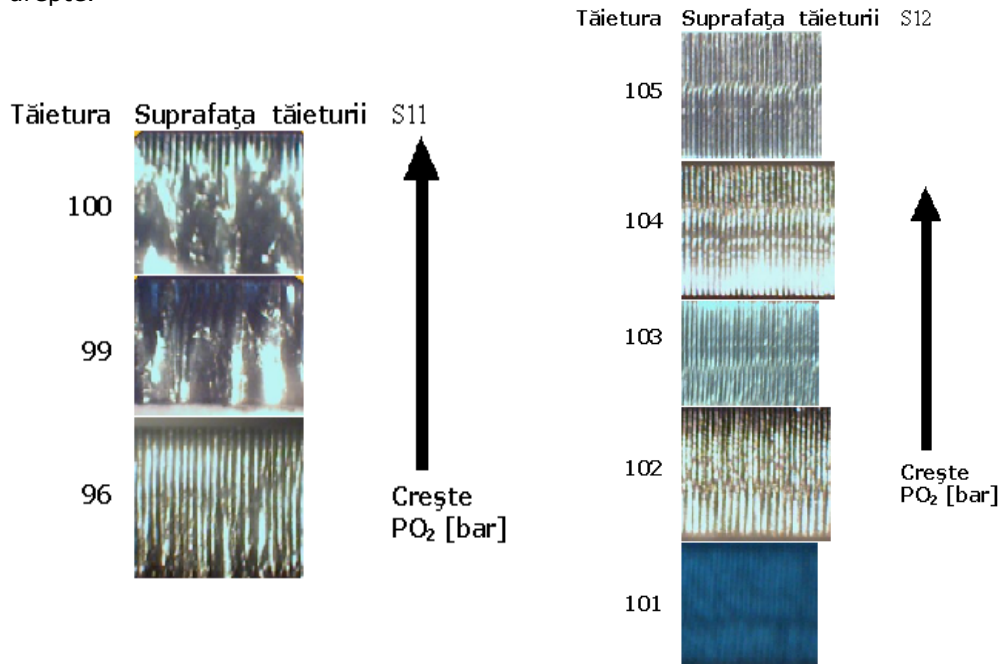


Figura 5.15. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S11

Figura 5.16. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S12

Pentru seria S13 (figura 5.17.), creșterea presiunii oxigenului nu influențează calitatea suprafeței tăieturii. Aceasta este una slabă, neregularitățile micrometrice sunt mari, mai apropiate de forma unor ridicături neregulate. Această formă se datorează condițiilor de iradiere, mai ales scăderii frecvenței de pulsare, ceea ce a generat automat neregularități micrometrice mai mari.

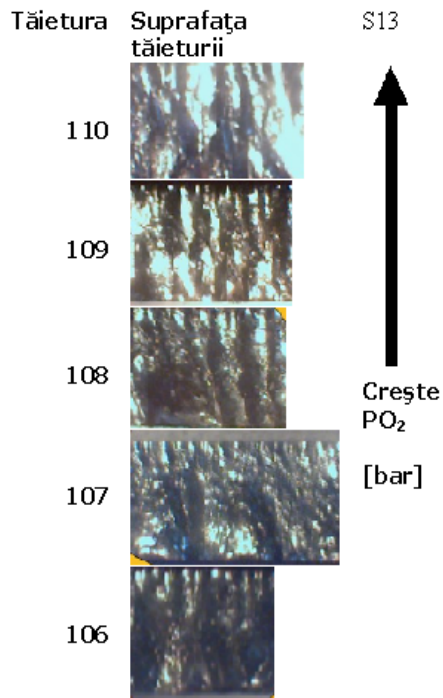


Figura 5.17. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S13

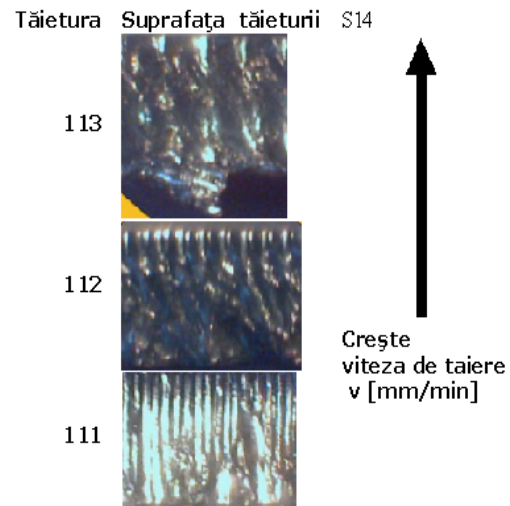


Figura 5.18. – Imagini ale suprafețelor tăieturii pentru seria experimentală S14

Pentru seria S14 (figura 5.18.), se observă înclinarea neregularităților micrometrice odată cu creșterea vitezei de tăiere. Aspectul lor este mai lat. La suprafață se observă tendința de dublare (despicare a neregularităților micrometrice). Calitatea suprafeței tăieturii este slabă. Creșterea presiunii oxigenului duce la formarea de bavuri la partea inferioară.

Pentru replicile efectuate în punctul central al experimentului factorial se observă că forma neregularităților micrometrice și calitatea suprafețelor sunt reproductibile (figura 5.19.).



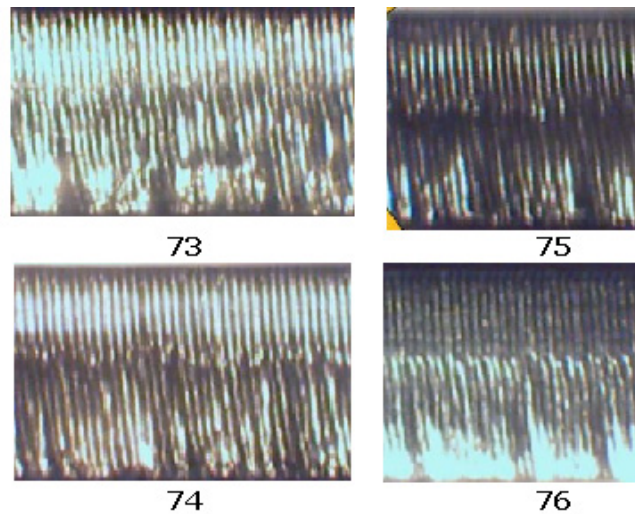


Figura 5.19. - Imagini ale suprafețelor tăieturilor pentru replicile în punctul central.

Din observațiile asupra tăieturilor se disting următoarele concluzii:

- puterea ridicată asigură stabilitatea procesului și scade efectul altor parametri asupra suprafeței tăieturii;
- viteza de tăiere produce două efecte:
  - a) înclinarea neregularităților micrometrice și deformarea acestora la partea inferioară;
  - b) apariția de ridicături cu menținerea neregularităților micrometrice drepte.
- Numai unul din aceste două efecte este prezent.
- frecvența de pulsare determină mărimea neregularităților micrometrice. Cu cât acestea sunt mai mici cu atât crește calitatea suprafeței.
- presiunea oxigenului are un efect secundar celui dat de parametrii de iradiere.

Problema neregularităților micrometrice la suprafața piesei a fost tratată în lucrările [Chen, 1997], [Chen, 1999 a], [Poprawel, 1998], [DiPietro, 1995], [Kaebernic, 1998].

#### 5.4. Înclinația și amplitudinea neregularităților micrometrice

Observarea și măsurarea formei neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii se poate face în următoarele condiții:

- Selectarea neregularităților micrometrice la suprafața piesei pentru a fi măsurate. În profunzimea materialului forma și dimensiunile neregularităților micrometrice se modifică prin creștere;
- Se urmărește corelarea neregularităților micrometrice la partea superioară a piesei cu viteza de tăiere.

Înclinația și amplitudinea neregularităților micrometrice a fost măsurată prin metoda analizei fotogrammetrice. Pe fotografiile realizate s-a cunoscut grosimea piesei. S-a determinat lungimea de undă  $\Lambda$  [mm] și înclinarea

neregularităților micrometrice (pentru cele de la suprafața piesei) Un calcul simplu arată că pentru a menține întreg în fasciculul laser (pentru diametrul fascicolului de 0,2 mm și grosimea materialului de 3 mm) este necesar ca unghiul de înclinare a neregularităților micrometrice să fie mai mare de  $86^{\circ}$  de grade. Din tabel se observă că înclinația minimă observată a fost de  $82^{\circ}$ . S-a arătat astfel că în cele mai multe cazuri întreg frontul de tăiere este iradiat de fasciculul laser. Unghiul minim obținut  $82^{\circ}$ , se asociază cu o distanță de 0.42 mm pe suprafața piesei. Aceasta înseamnă două spoturi laser alăturate sau altfel exprimat valoarea 0 pentru raportul *spo*.

Pentru lungimea de undă a neregularităților micrometrice la suprafața piesei s-au realizat următoarele asociații cu parametri variați:

- creșterea vitezei de tăiere duce la scăderea lungimii de undă a neregularităților micrometrice pe suprafața piesei;
- lungimea de undă a neregularităților micrometrice este mai mică sau apropiată de cea a diametrului fascicolului laser. Se arată că la nivel de principiu mecanismele care stabilizează lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei sunt de același tip cu cele care duc la formarea neregularităților micrometrice la suprafața piesei;
- nu există o corelație clară între lungimea de undă a neregularităților micrometrice pe suprafața piesei și parametrii de proces.



Tabelul 5.2. - Măsurători și date fotogrammetrice

Tăietura	Viteza de tăiere v [mm/min]	Lungimea de undă a neregularităților micrometrice $\Lambda$ [mm]	Înclinarea neregularităților micrometrice [grade]	Tăietura	Viteza de tăiere v [mm/min]	Lungimea de undă a neregularităților micrometrice $\Lambda$ [mm]	Înclinarea neregularităților micrometrice [grade]
6	2500	0.075	88	75	2100	0.145	83
7	2500	0.069	83	76	2100	0.139	83
8	2500	0.139	86	77	2100	0.166	83
10	2500	0.2	85	78	500	0.291	90
17	2500	0.292	90	85	2500	0.193	85
18	2500	0.225	82	88	1300	0.115	90
19	2500	0.187	88	89	1300	0.171	80
21	2500	0.23	90	90	3000	0.092	81
23	2500	0.075	90	91	3000	0.5	90
24	2500	0.075	90	92	1300	0.12	83
25	2500	0.174	90	93	1300	0.125	90
30	2500	0.076	82	94	2100	0.118	83
31	2500	0.157	85	95	2100	0.103	83
32	300	0.529	90	96	900	0.234	90
33	1300	0.272	90	99	900	0.3	90
34	3000	0.153	84	100	900	0.215	90
42	3000	0.4	90	101	900	0.139	86
43	3000	0.348	88	102	900	0.183	90
49	1300	0.383	84	103	900	0.214	90
50	1300	0.21	90	104	900	0.215	90
54	1300	0.075	87	105	900	0.214	90
55	1300	0.127	83	106	900	0.714	90
56	1300	0.153	90	107	900	0.428	85
57	3000	0.109	85	108	900	0.384	85
58	3000	0.142	88	109	900	0.567	85
65	1300	0.146	89	110	900	0.428	90
66	1300	0.142	90	111	300	0.209	90
67	1300	0.139	84	112	600	0.545	90
68	1300	0.146	85	113	1200	1.046	85
69	1300	0.136	85	116	300	1.304	90
72	1300	0.13	86	117	600	0.26	90
73	2100	0.176	82	118	1200	0.78	84
74	2100	0.153	83				

### 5.5. Evaluarea durității materialului în secțiune perpendiculară pe suprafața tăieturii

Pentru studiul durificării materialului în zona tăieturii s-au selectat probe supuse experimentărilor clasice. După secționarea tăieturii s-a măsurat duritatea Vickers HV1 pe colț, pornind de la suprafața tăieturii către interiorul materialului piesei figura 5.13. Probele analizate sunt prezentate în figura 5.14

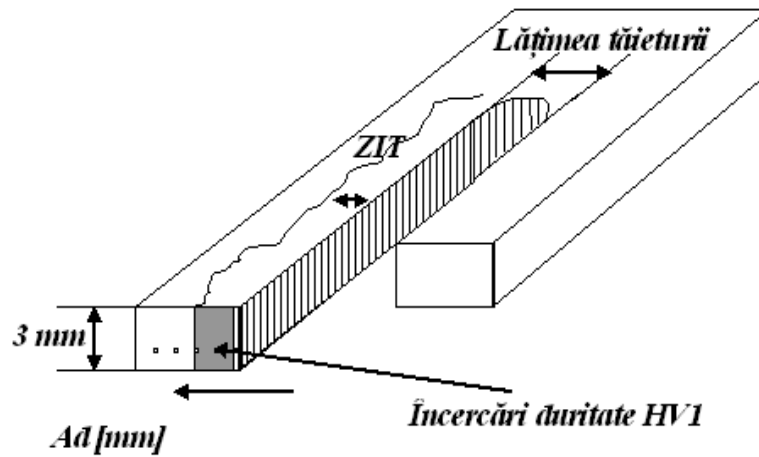


Figura 5.13. – Măsurarea durității pe suprafața tăieturii

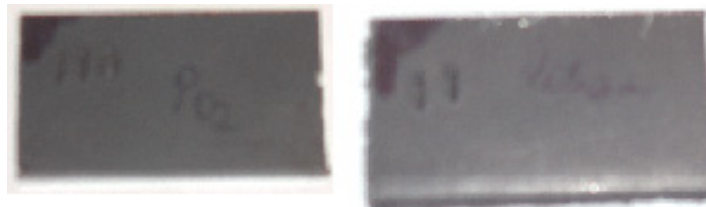


Figura 5.14. – Probele pentru analiza de material

Rezultatele obținute au arătat că în toate cazurile analizate, materialul s-a durificat pe o adâncime de 0,4 mm. Ca și nivel de durificare se poate spune că duritatea materialului s-a dublat în apropierea suprafeței tăieturii. Se observă, de asemenea, că durificarea a fost mai pronunțată pentru tăieturile la care s-a utilizat o energie liniară mai ridicată. Reprezentarea grafică a variației durității tăieturii în profunzimea piesei este prezentată în graficele următoare.

În figura 5.14., se prezintă variația durității materialului în profunzimea acestuia la suprafața tăieturii. Sunt comparate mai multe serii experimentale pentru care s-a variat viteza de tăiere. Se observă că variația este similară pentru toate cele trei serii experimentale. Se observă că pe tot domeniul experimental valorile durității scad odată cu creșterea vitezei de tăiere. Se arată astfel că nivelul de durificare al materialului crește cu timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Se arată astfel că folosirea de viteze de tăiere ridicate produce zone

afectate termic mici și scade durificarea și prin aceasta fragilizarea materialului la marginea tăieturii.

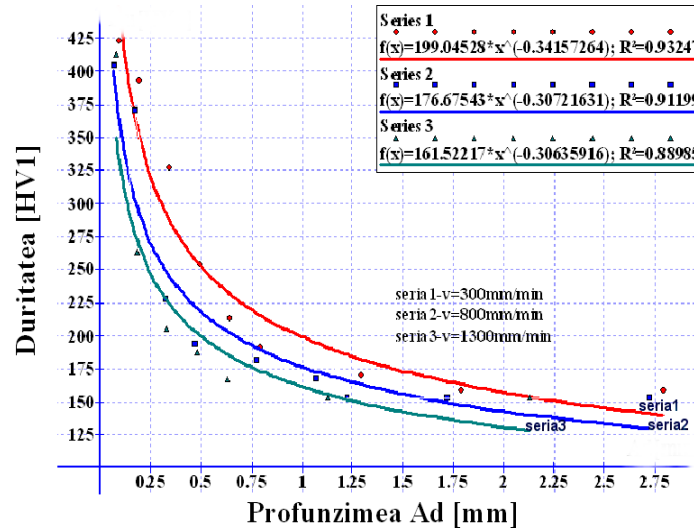


Figura 5.14. – Dependența durității HV1 cu adâncimea în piesă, pentru probe la care s-a modificat viteza de tăiere

În figura 5.15., se prezintă variația durității materialului în profunzimea acestuia pentru două serii experimentale care diferă prin valoarea frecvenței. Se observă același tip de variație ca și în cazul anterior analizat. Se observă că valorile durității sunt apropiate. Nu poate fi distins un nivel de durificare distinct pentru cele două cazuri.

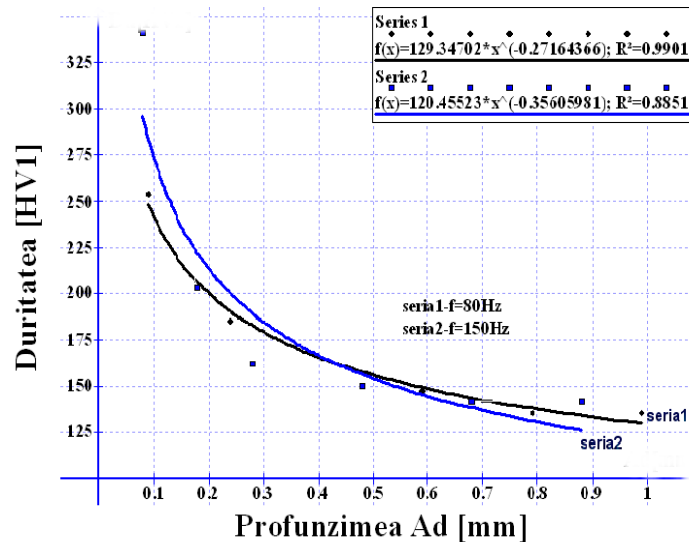


Figura 5.15. – Dependența durității HV1 cu adâncimea în piesă, pentru probe la care s-a modificat frecvența

În figura 5.16., se prezintă variația durității în profunzimea materialului pentru două probe la care diferă prin valoarea puterii. Se observă că puterea mai mare produce o durificare mai puternică la începutului domeniului experimental. Aici este zona în care valorii durității sunt ridicate și durificarea materialului este importantă. Se arată astfel că nivelul crescut al intensității fasciculului laser produce creșterea durificării materialului.

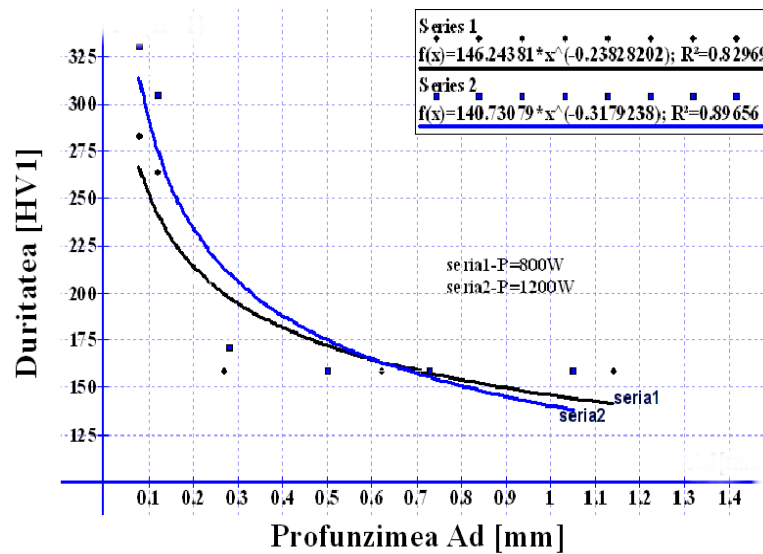


Figura 5.16. – Dependența durității HV1 cu adâncimea în piesă, pentru probe la care s-a modificat puterea

În figura 5.17., se prezintă variația durității materialului cu profunzime în material realizate pentru probe la diferite valori ale presiunii oxigenului. Duritatea variază la fel pentru probele analizate. Această variație se prezintă sub forma unei scăderii exponențiale. Se observă că nivelul de durificare al materialului crește odată cu creșterea presiunii oxigenului. Aceasta se explică prin creșterea efectului reacției de oxidare și încălzirea puternică a materialului. Pentru presiunea de 0,08 MPa se observă o scădere puternică a durității materialului. Aceasta este asociată cu îndepărtarea excesivă a topiturii și prin aceasta scăderea efectului reacției de oxidare.

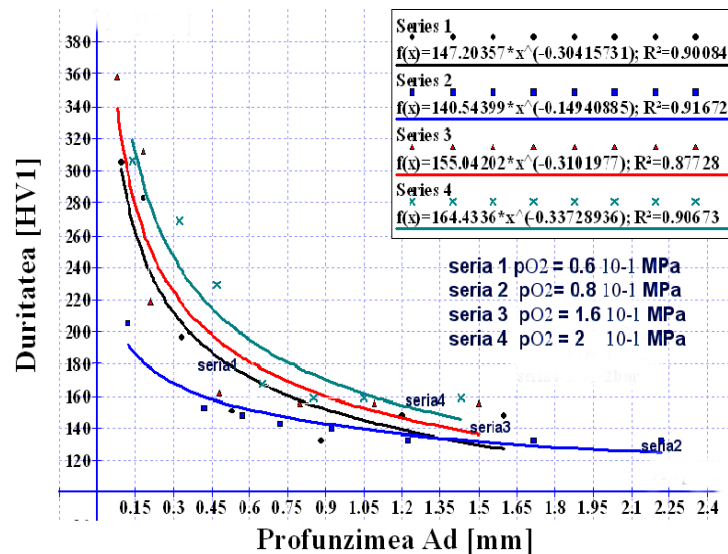


Figura 5.17. – Dependența durtății HV1 cu adâncimea în piesă, pentru probe la care s-a modificat presiunea oxigenului

În figura 5.18., se prezintă variația durtății în profunzimea materialului pentru probe care diferă prin valorile pentru energia liniară. În toate cazurile analizate se observă o descreștere puternică a valorilor durtății odată cu creșterea profunzimii în material. Se observă că odată cu creșterea valorilor energiei liniare crește și nivelul valorilor durtății. Se obțin nivele distincte ale valorilor durtății pe tot domeniul experimental cu condiția ca diferența între valorile energiei liniare să fie peste 100 J/cm .

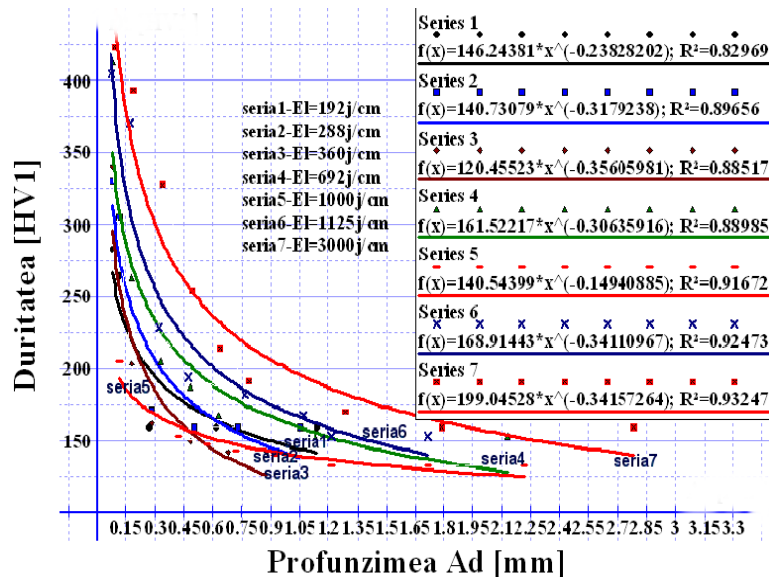


Figura 5.18. – Dependența durtății HV1 cu adâncimea în piesă, pentru probe la care s-a modificat energia liniară

### 5.6. Evaluarea rugozității suprafețelor tăieturilor

Evaluarea rugozității suprafețelor s-a efectuat cu ajutorul unui rugozimetru. S-a măsurat  $R_a[\mu\text{m}]$  (rugozitatea medie),  $R_z[\mu\text{m}]$  (rugozitatea maximă),  $R_t[\mu\text{m}]$  (rugozitatea transversală) conform Standard ISO - 1997. Lungimea de evaluare a fost  $L=5\text{mm}$ . S-au realizat cinci evaluări pe lungimea de bază de  $1\text{mm}$ , folosind un filtru cu profil Gaussian  $L_c=0,25\text{mm}$ ,  $L_s=0,025\text{mm}$  (fig. 5.19.).

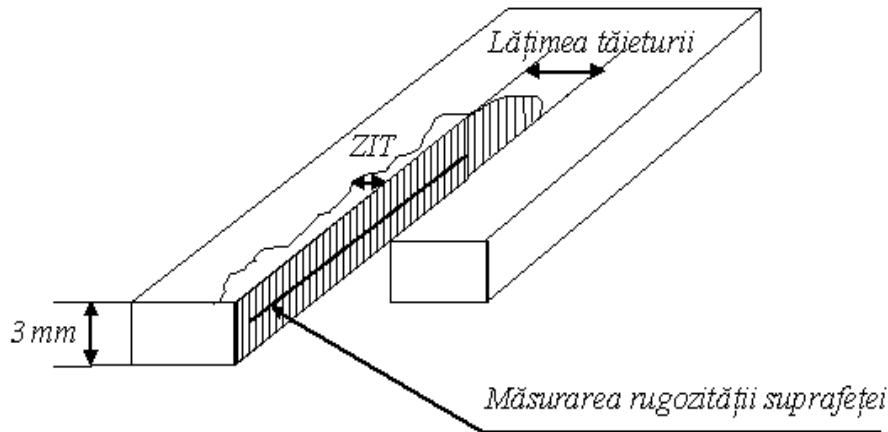


Figura 5.19. – Rugozitatea suprafețelor tăieturilor

Valorile rugozității suprafeței pentru tăieturile studiate au fost interpretate în funcție de energia liniară (Tabel 5.3.).

Tabel 5.3. – Rugozitatea suprafeței tăieturilor

Tăietura	Energia liniară [J/cm]	$R_a[\mu\text{m}]$	$R_z[\mu\text{m}]$	$R_t[\mu\text{m}]$
12	1125	3.480	15.516	21.590
13	692	1.945	9.676	10.746
16	360	2.030	11.646	18.709
17	360	1.479	6.850	8.058
30	192	0.358	2.723	3.813
31	198	0.550	3.374	4.004

Se observă că valorile obținute pentru rugozitatea suprafeței tăieturii sunt mai mari atunci când energia liniară este mai mare. Această concluzie nu poate fi generalizată. Ca valoare orientativă s-a arătat că mărimea neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii, pentru tăieturi care sunt de calitate, este de 10 ori mai mică decât diametrul fascicului laser.

## 5.7. Evaluarea structurii materialului în zona afectată termic

Oțelul nealiat este supus în timpul tăierii termice la modificări semnificative structurale și ale caracteristicilor mecanice. Acestea sunt dependente de:

- temperatura indusă materialului,
- durata de încălzire și vitezele de răcire.

Corelat cu nivelele și cumulearea acestor factori este afectată dimensiunea grăunților și compoziția chimică.

Procedeul laser este caracterizat prin temperaturi ridicate de operare, energie liniară redusă și viteză mare de tăiere. În aceste condiții, materialul procesat este supus unor gradienti termici deosebit de ridicați. Consecința este dezvoltarea unei zone afectate termic laterale tăieturii, nu mai lată de un milimetru. Identificarea subzonelor caracteristice necesită examinarea la mărimi mari. Se constată o subzonă supraîncălzită în imediata apropiere a tăieturii, cu granulație grosolană.

Datorită răcirii rapide materialul procesat are duritate ridicată, tenacitate scăzută, adică fragilitate ridicată.



Figura 5.20. – Pregătirea probelor pentru analiza metalografică

Subzona următoare este caracterizată prin transformări structurale specifice normalizării, cu granulație fină.

Diminuarea efectelor termice ale procesului generează în subzona următoare transformări incomplete metalurgic, constând din austenită transformată în perlită fină, în timp de grăunții de ferită proeutectoidă nu sunt afectați. Granulația în această subzonă este deosebit de neomogenă.

Având în vedere concentrarea transformărilor structurale pe lățime redusă de la latura tăieturii termice, sunt induse tensiuni remanente ridicate. Subzona următoare este caracterizată prin transformări structurale specifice normalizării, cu granulație fină.



Diminuarea efectelor termice ale procesului generează în subzona următoare transformări incomplete metalurgic, constând din austenită transformată în perlită fină, în timp ce grăunții de ferită proeutectoidă nu sunt afectați. Granulația în această subzonă este deosebit de neomogenă. Având în vedere concentrarea transformărilor structurale pe lățime redusă de la latura tăieturii termice, sunt induse tensiuni remanente ridicate.

În figura 5.21. sunt prezentate imagini ale microstructurii materialului, perpendicular pe suprafața tăieturii. Se observă că materialul este neomogen, corelat cu efectele câmpurilor termice induse.

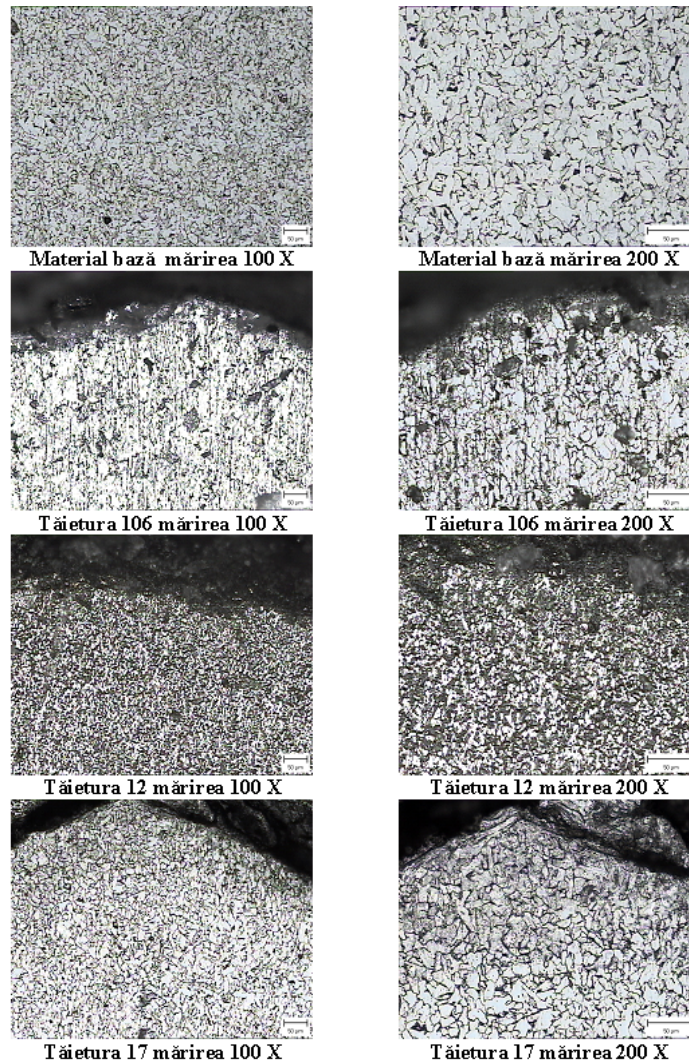


Figura 5.21. – Imagini ale microstructurii materialului perpendicular pe tăietură



Afectarea termică este foarte mică. Se observă apariția de interstiții între grăunții materialului și cumulării de elemente de aliere între grăunții materialului de bază. Nu se modifică structura și dimensiunile grăunților.

Studii asupra structurii materialului însoțite de modelare analitică asupra au fost prezentate în lucrările [Alduladi, 1998], [Glod, 2009 b], [Jebbari, 2008].

## 5.8. Concluzii

În Capitolul 5 sunt prezentate probleme legate de calitatea suprafeței tăieturii. Se urmăresc următoarele probleme:

- înclinarea suprafeței tăieturii în raport cu suprafața piesei;
- stabilitatea formei tăieturii în raport cu suprafețele piesei, punerea în evidență a neregularităților micrometrice care apar pe suprafața tăieturii;
- metode de monitorizare a procesului de tăiere și de observare a instabilităților care apar de-a lungul tăieturii;
- aspecte asupra forme și frecvenței neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii;
- înclinarea frontului de tăiere și asocierea între aceasta și viteza de tăiere
- evaluarea rugozității suprafețelor tăieturii
- evaluarea durității materialului în zona tăieturii
- modificarea structurii materialului și a zonei afectate termic.

Aceste probleme vor fi dezvoltate în cele ce urmează.

Înclinarea suprafețelor tăieturii în raport cu suprafața piesei a fost introdusă prin raportul de paralelism. Raportul de paralelism a fost definit independent de tipul de înclinarea a tăieturii spre partea inferioară a piesei sau spre partea superioară a piesei. Raportului de paralelism a avut valoarea 1 pentru tăieturi nepenetrante și valoarea 0 pentru tăieturi drepte. Toate valorile raportului de paralelism se încadrează între aceste limite. S-au arătat următoarele:

- Raportul de paralelism scade cu creșterea puterii.
- Raportul de paralelism scade cu viteza de tăiere pentru valori mici ale timpului pulsului.
- Raportul de paralelism scade cu creșterea ciclului.

Înclinarea suprafețelor tăieturii devine importantă relativ la grosimea materialului. Din punct de vedere tehnologic se dorește obținerea de tăieturi drepte.

Evaluarea tăieturii realizate din punctul de vedere al calității care se prezintă de-a lungul tăieturii. Problemele legate de calitatea tăieturii de-a lungul acesteia se structurează după cum urmează:

- stabilitatea tăieturii constă în reproductibilitatea formei tăieturii de-a lungul acesteia fără să apară rupturi (asimetria tăieturii) sau creșterii ale lățimii tăieturii. Tăieturile realizate au fost stabile, atât cele bune cât și cele care au un aspect de găurire repetată. Astfel se arată se arată că fenomenele termice care produc topitura au o reproductibilitate;

- instabilitățile observate s-au observat la începutul procesului de tăiere.

Factorul care apare suplimentar față de alte procesele de tăiere laser este prezența arderii fierului. Aceasta se desfășoară, după cum s-a arătat, și în spatele capului laser. Există astfel posibilitatea existenței unei arderi secundare care să crească excesiv lățimea tăieturii. Această ardere poate fi datorată unei alimentări accidentale în spate cu oxigen;

- Împrăștierea de topitură la suprafață piesei duce la depunerea de stropi de topitură pe piesă. Unii din acești stropi sunt fini și se depun pe suprafața piesei. Acest fenomen devine mai puternic pentru tăieturi nepenetrante sau prinse la partea inferioară a tăieturii. Depunerea de topitură pe piesă reprezintă o scădere indirectă a calității tăieturii, indiferent de lățimea tăieturii;

- depunerea topiturii la partea inferioară a piesei sub formă de bavuri ca exces al materialului topit. S-a obținut o tăietură care a fost realizată și apoi umplută cu topitură.

Suprafața tăieturii prezintă neregularități micrometrice. Ca obiect de studiu s-a considerat pentru acestea frecvența lor de-a lungul tăieturii, prin măsurarea lungimi lor de undă de-a lungul tăieturii. Asupra acestor tăieturi s-au formulat următoarele observații:

- La creșterea puterii lungimea de undă a neregularităților micrometrice și se strică forma tăieturii la partea inferioară a piesei.
- Creșterea vitezei de tăiere asigură îmbunătățirea calității suprafeței tăieturii. La viteze de tăiere mari apare creșterea neregularităților micrometrice.
- Presiunea oxigenului în unele cazuri nu produce nici un efect asupra neregularităților micrometrice. În alte cazuri se produce o deteriorare importantă a calității suprafețelor ceea ce arată a creștere a contribuției reacției de oxidare.
- Creșterea frecvenței scade lungimea de undă a neregularităților micrometrice însă strică forma suprafeței tăieturii la partea inferioară a tăieturii.
- Valorile ciclului nu influențează neregularitățile micrometrice la partea superioară a tăieturii. Valorile mici ale ciclului scad calitatea tăieturii la partea inferioară a piesei.
- În același condiții de iradiere tipul și forma neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii sunt reproductibile.

Pentru înclinarea neregularităților micrometrice la suprafața tăieturii s-a realizat o analiză fotogrammetrică. Aceasta a arătat următoarele:

- viteza de tăiere produce înclinarea neregularităților micrometrice pe suprafața tăieturilor;
- neregularitățile micrometrice au înclinări mari apropiate de  $90^\circ$  ceea ce arată că frontul de tăiere se dezvoltă numai în zona direct iradiată de fasciculul laser.

Rugozitatea suprafeței tăieturilor este legată de prezența neregularităților micrometrice. Valorile rugozității măsurate nu au fost asociate cu parametrii de proces.

Asupra tăieturilor realizate s-a efectuat o selecție. Astfel tăieturile realizate se împart în tăieturi care au o calitate bună a tăieturii și tăieturi care prezintă o calitate redusă marcată mai ales prin afectări termice vizibile ale materialului. Pentru variația durtății materialului în zona tăieturii s-au observat următoarele:

- Există o durificare a materialului în zona tăieturii pe o profunzime mică în material. Duritatea scade rapid către cea a materialului de bază.
- Creșterea presiunii oxigenului duce la creșterea durificării materialului în zona tăieturii.

- Folosirea unei iradiere mai puternice (prin creșterea intensității fascicolului laser și/sau a timpului de interacțiune între radiația laser și material) duce la o creștere a durificării materialului.

Durificarea materialului este însoțită de o modificare a structurii materialului în zona tăieturii. Aceasta se manifestă prin alungirea grăunților și creșterea spațiului dintre aceștia.

Pe ansamblu cercetările prezentate au arătat că condițiile de iradiere sunt acelea care determină calitatea suprafețelor obținute.

## 6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Tăierea cu fascicul laser asistată de oxigen este o tehnologie neconvențională întrebunțată pentru îndepărtarea, cu precădere a materialelor metalice (aplicată oțelurilor), în care se folosește fasciculul laser și reacția chimică de ardere a fierului în oxigen. În principiu, fasciculul laser are rolul de sursă termică de preîncălzire iar oxidarea fierului din oțel produce energia necesară topirii. Jetul de oxigen asigură îndepărtarea materialului topit și, în același timp, alimentarea reacției de ardere. Tăierea cu laser a oțelurilor oferă posibilitatea realizării unor tăieturi de calitate, în cazul tablelor subțiri. Procedeul laser este pe larg răspândit în industria navală, industria constructoare de mașini și în industria de armament. Punctul forte este productivitatea prin tăierea rapidă a unor mari cantități de material.

### 6.1. Analiza îndeplinirii obiectivelor cercetării doctorale

Teza de doctorat a avut în vedere evidențierea aspectelor tehnologice și fenomenologice ale procesului de tăiere laser asistată de oxigen. Îndeplinirea obiectivelor tezei va fi analizată în cele ce urmează.

#### O.1. Sinteza informațiilor și cunoștințelor în evoluția aplicării industriale a procedurii laser la decuparea materialelor.

Realizarea obiectivului O.1. se desfășoară, în principal, în cuprinsul Capitolului 1. Acest obiectiv se regăsește în următoarele direcții de cercetare abordate:

- prezentarea condițiilor experimentale pentru alte cercetări în tăierea laser asistată de oxigen;
- stabilirea unor elemente semnificative asupra procesului de tăiere laser, cum ar fi: identificarea mecanismului de îndepărtare a materialului din tăietură prin topire pentru tăierea materialelor metalice, formarea frontului de topire și a frontului de tăiere (frontul de eroziune), efectul particular de ardere a fierului în oxigen, efectul gazului asistent la îndepărtarea materialului topit;
- integrarea elementelor particulare într-un model care să prezinte desfășurarea procesului de tăiere la modul general, având semnificație din punct de vedere tehnologic;
- prezentarea modului de analiză și de reprezentare a variației mărimilor măsurate cu parametrii modificați pentru cercetări experimentale de tip clasic, respectiv, pentru experimentări de tip factorial, însoțită de prelucrarea statistică a datelor experimentale realizate de către alți cercetători;
- prezentarea condițiilor experimentale în care s-au realizat cercetări experimentale similare, alături de concluzii importante referitoare la procesul de tăiere laser;

- importanța industrială a procesului de tăiere laser, încadrarea lui în cadrul proceselor de tăiere prin topire și abordarea aspectelor economice.

Autorul a prezentat în mai multe lucrări sinteze asupra procesului de tăiere laser asistată de oxigen, inclusiv asupra aplicării acestui proces industrial efectiv, la S.C. „Compa” S.A. Sibiu.

Procesul de tăiere laser asistată de oxigen cuprinde o fenomenologie. Ca și contribuție a autorului se remarcă selecția unor aspecte semnificative ale procesului de tăiere laser și îmbinarea acestora într-o schemă dinamică care permite înțelegerea procesului de tăiere: iradierea cu fascicul laser, - penetrarea materialului (prin efectul cumulat al topirii, vaporizării și mișcării topiturii), - stabilizarea frontului de tăiere alături de reacția de oxidare, - stabilizarea procesului de tăiere.

Alături de sinteza propriu-zisă, teza de doctorat conține aplicarea unor idei și programe de cercetare. Dintre acestea se remarcă bilanțul energetic pentru un proces de tăiere considerat stabil, îmbinarea cercetărilor de tip clasic cu cele de tip factorial, metodele de analiză a suprafeței și structurii materialului în zona tăieturii.

### **0.2. Elaborarea și aplicarea modelului de tip intrare-ieșire la controlul și optimizarea procesului de tăiere laser cu CO<sub>2</sub>.**

Modelul cibernetic de tip intrări-ieșiri este asociat cu utilizarea planului experimental factorial. Acesta prezintă asocierea dintre mai mulți parametri variați – intrări, cu mai multe funcții obiectiv – ieșiri. În Capitolul 2, se prezintă parametrii modificați și funcțiile obiectiv care vor fi analizate.

Astfel parametrii modificați controlează iradiere, presiunea oxigenului și distanța dintre diuză și piesă și care pot fi reglați pe comanda numerică a sistemului tehnologic. Ca funcții obiectiv s-au analizat lățimea tăieturii la partea superioară, respectiv la partea inferioară. Lățimea tăieturilor a fost direct măsurată cu microscopul optic.

Cercetarea a fost structurată pe două planuri experimentale de tip factorial, plan experimental factorial complet, respectiv plan experimental factorial incomplet. Utilizarea planurilor experimentale factoriale permite studiul interacțiunilor între parametri, lucru care nu poate fi realizat prin experimentări de tip clasic.

În Capitolul 4, sunt analizate variațiile lățimii tăieturii pentru planul experimental factorial. Analiza urmează o procedură care urmărește aspectul statistic al variațiilor și a fost realizată prin exploatarea programului STATGRAPHICS. Aceasta a prezentat o modelare matematică, ierarhizarea efectelor prin diagrame PARETO și analiza suprafețelor de răspuns.

Importanța analizei prezentate se exprimă astfel:

- cercetare experimentală având un aspect particular legat de sistemul tehnologic și de parametrii variați asupra tăieturilor realizate cu fascicul laser pentru table din oțel nealiat S235 - SR EN 10025 (OL 37), folosind un plan experimental factorial complet 2<sup>5</sup>;

- asocierea valorilor lățimii tăieturii cu aspecte fenomenologice cum ar fi formarea de material topit sau vaporizarea materialului, astfel interpretarea rezultatelor experimentale este mai complexă și nu se rezumă strict la lățimea tăieturii măsurate;

- analiza rolului fiecărui parametru în parte asupra funcției obiectiv, după o schemă de tip anticipare a efectelor – confirmare experimentală;

- analiza separată a efectului parametrilor și a grupelor de parametri, distincția între parametri care controlează iradierea și presiunea oxigenului, distincția între putere care controlează durata de interacțiune între radiația laser și material, viteza de tăiere, frecvența și ciclul;

- utilizarea de modele matematice polinomiale și în produs folosind sistemul de valori codificate, respectiv sistemul de valori reale pentru parametri variați;

- analiza condițiilor de extrem pentru suprafețele de răspuns date de formule de tip pătratic;

- analiza tipului de variație pe domeniul experimental pentru suprafețele de răspuns date de formule de tip liniar.

Optimizarea unui proces tehnologic înseamnă trecerea la aprecierea asupra condițiilor în care se realizează procesarea, de la calificativul «bun» la calificativul «mai bun». Realizarea procesului de tăiere a fost pusă în legătură cu lățimea tăieturilor realizate prin măsurare lățimii tăieturii la partea superioară a piesei, respectiv lățimea tăieturii la partea inferioară piesei. Optimizarea procesului de tăiere asistată de oxigen prezintă două obiective importante. Acestea sunt :

- creșterea vitezei de tăiere ;
- reducerea lățimii tăieturii.

Principalul parametru care poate fi optimizat este viteza de tăiere. Creșterea vitezei de tăiere înseamnă obținerea de mai mult material tăiat în același timp. Oscilatorul laser, sistemul cinematic și sistemele auxiliare au un consum de energie aproape constant pe timpul procesului de prelucrare. Economia de energie se realizează prin reducerea timpului de funcționare a sistemului tehnologic laser. Aceasta se poate realiza prin creșterea vitezei de tăiere. În prezenta lucrare, optimizarea asupra vitezei de tăiere a fost analizată direct și prin intermediul eficienței la îndepărtarea materialului  $Q$  [ $J/mm^3$ ], care ia în considerare și lățimea tăieturii. Ambele probleme sunt tratate în Capitolul 4.

Pentru viteza de tăiere se formulează două probleme în contradicție: viteza de tăiere trebuie să fie cât se poate de mare pentru ca procesul de tăiere laser să fie rentabil din punct de vedere economic, iar pe de altă parte, să fie suficient de mică pentru ca materialul să poată fi tăiat.

Pentru ceilalți parametri modificați singura condiție care se formulează relativ la optimizarea procesului de tăiere, este aceea de a asigura o lățime a tăieturii minimă. Ca principiu se va evita iradierea excesivă a materialului prin creșterea puterii fasciculului laser sau a duratei de interacțiune între radiația laser și material.

Modalitățile de realizare a optimizării procesului de tăiere laser asistată de oxigen sunt următoarele:

- identificarea de valori maxime și minime la funcțiile de regresie determinate pentru modificările date de seriile experimentale clasice;
- identificarea tipului variației și forma curbei pentru variația lățimii tăieturii la seriile experimentale clasice;
- identificarea unor maxime și minime la extremele domeniului experimental pentru suprafețele de răspuns la experimentul factorial E1, unde funcția de corelație este de tip pătratic (în două variabile);
- identificarea tipului variației pe domeniul experimental, cu punct de interes către centrul domeniului experimental pentru experimentul factorial E2, unde funcția de corelație este de tip liniar (în două variabile);
- analiza directă a valorilor coeficienților care apar în modelele matematice care utilizează sistemul codificat;

- aplicarea directă a determinării maximelor și minimelor (prin derivarea funcției) pentru modelele matematice care folosesc valorile reale ale parametrilor modificați;
- aplicarea de modificări ale parametrilor care țin cont de rolul efectelor prezentate de diagramele PARETO.

Diagramele PARETO și analiza statistică prin metoda ANOVA au arătat că rolul principal revine interacțiunilor. Astfel că și problemele de optimizare pot fi corect puse dacă se realizează modificări asupra mai multor parametrii. Se remarcă în acest sens gruparea parametrilor și asocierea acestora cu fenomenele fizice produse de aceștia.

Cercetarea experimentală are prin însăși modul său de organizare un caracter restrâns, de conjunctură, dat în primul rând de selecția domeniului experimental (în sens mai larg, interval de modificare a parametrilor, pas de variație, nivele). Identificarea tipului variației pe domeniul experimental dat de funcțiile care desemnează modelul matematic, alături de prezentarea unui coeficient de corelație ridicat, face ca rezultatele cercetării experimentale să depășească aspectul particular dat de programul experimental. Ca problemă separată este necesară o clasificare a importanței metodelor utilizate. Astfel se realizează următoarele enunțuri:

- dacă modelele matematice au o corelație ridicată atunci tipul variației este important;
- dacă modelele matematice au o corelație scăzută atunci valoarea absolută a variației este importantă.

Tăierea laser asistată de oxigen prin efectul ridicat al interacțiunilor face ca o experimentare strictă în care sistemul tehnologic este considerat ca «black box» să fie profund particulară. Devine esențial pentru interpretare, asocierea cercetării experimentale cu aspecte ale fenomenelor fizice care intervin. Suprafețele de răspuns au arătat efecte semnificative între cele două valori ale distanței dintre diuză și piesă  $ddp=1\text{mm}$ , respectiv  $ddp=2\text{ mm}$  în aceleași condiții experimentale.

### **0.3. Modelarea analitică și experimentală a caracteristicilor tăieturilor realizate cu laser.**

Problemele de modelare se referă la obținerea de corelații matematice între parametrii modificați și funcțiile obiectiv nominalizate în principal prin mărimi măsurate. În această lucrare a fost prezentată modelarea analitică și modelarea experimentală.

Modelarea analitică realizată a soluționat următoarele probleme:

- descrierea fenomenelor de încălzire și de transformare de fază induse în material la iradierea cu fascicul laser;
- descrierea efectului dat de condițiile de iradiere asupra piesei prin capacitatea fascicului laser de a genera transformări de fază în material;
- prezentarea bilanțului energetic care asigură realizarea unui proces de tăiere stabil, realizarea unei legături între viteza de tăiere și lățimea tăieturii.

Abordarea modelării analitice a început în Capitolul 1, prin selecția unor probleme care pot face obiectul modelării. Dezvoltarea acestor idei este cuprinsă în Capitolul 3. Ideea de bază a fost realizarea unei viziuni secvențiale asupra procesului de tăiere laser. Modelarea analitică a avut ca punct central lățimea

tăieturii. Aceasta este o funcție obiectiv care permite realizarea de asocieri multiple în caracterizarea procesului de tăiere. S-a observat că funcțiile obiectiv specifice, mai ales cele care prezintă caracteristici ale suprafeței tăieturii, nu pot face obiectul unei modelări analitice generale. Pentru funcțiile obiectiv modelate analitic se recomandă asocierea acestora cu modelarea experimentală. În această lucrare se insistă mai mult pe metoda de modelare analitică decât pe rezultate. Ipotezele considerate în modelarea analitică sunt largi, astfel că se prezintă o viziune de ansamblu asupra procesului de tăiere laser.

Modelarea matematică sau experimentală prezintă funcții de corelație fără a considera fenomenele fizice care stau la baza procesului tehnologic. Modelarea analitică a avut ca puncte importante următoarele:

- modelarea folosind funcții de regresie pentru serii experimentale;
- modelarea folosind modele polinomiale pentru experimentele de tip factorial.

Pentru unele mărimi, unde s-a urmărit numai tipul variației au fost folosite și reprezentări cu funcții spline. Pentru situația în care variația a inclus situații diferite (paralelismul tăieturii) au fost folosite funcții de regresie de tip liniar.

#### **0.4. Controlul și caracterizarea energetică a procesului de tăiere laser cu CO<sub>2</sub> a oțelurilor.**

Tăierea laser asistată de oxigen îmbină efectul fasciculului laser și analiza din punct de vedere energetic a procesului de tăiere, unde autorul a dorit să separe efectul acestora. Aspectul energetic a fost prezentat în următoarele analize:

- determinarea aspectelor legate de iradiere și capacitatea de a produce în material încălzirea și transformările de fază;
- exprimarea unei balanțe energetice pentru un proces de tăiere stabil;
- introducerea eficienței la îndepărtarea materialului pentru a exprima efectul energetic asupra fiecărei tăieturi în parte;
- evaluarea randamentelor (raporturi de puteri) care exprimă aspectul energetic al procesului de tăiere în legătură cu: prezentarea efectului fasciculului laser relativ la realizarea tăieturii prin topire, prezentarea efectului fasciculului laser relativ la amorsarea reacției de oxidare, determinarea randamentului general al procesului prin considerarea fasciculului laser și reacția de oxidare.

#### **0.5. Optimizarea tehnologică a calității suprafețelor tăieturilor realizate prin procesul de tăiere cu fascicol laser CO<sub>2</sub> a tablelor din oțel nealiat.**

Principalele aspecte ale calității suprafeței tăieturii sunt legate de înclinarea suprafeței tăieturii în raport cu suprafața piesei, prezența neregularităților micrometrice la suprafața piesei și de afectarea termică a materialului. Aceste probleme au fost abordate în Capitolul 5.

Înclinarea suprafețelor tăieturii în raport cu suprafața piesei a fost pusă în evidență prin măsurarea lățimii tăieturii și prin introducerea raportului de paralelism. De asemenea, afectarea termică poate fi observată pe tăieturile realizate. Un punct important îl constituie înregistrarea procesului de tăiere prin filmare și fotografiere digitală în format HD. Optimizarea pentru obținerea unor suprafețe de calitate a prezentat următoarele aspecte:

- folosirea acelor combinații ale parametrilor care asigură obținerea de tăieturi plane;



- folosirea unor nivele de iradiere moderate prin care se evită degradarea termică a materialului sau arderi excesive;
- realizarea de tăieturi înguste, pentru o calitate bună a suprafețelor.

Prin abordarea și îndeplinirea obiectivelor anterior prezentate, s-a realizat încadrarea cercetărilor într-o categorie largă de cercetări experimentale în tăierea laser asistată de oxigen.

## **6.2. Contribuții personale în derularea și finalizarea cercetării doctorale**

Autorul prezentei teze de doctorat a abordat, în mod original, întreaga activitate de cercetare științifică pe două direcții de cercetare:

- una orientată asupra procesului de decupare cu fascicul laser și condițiile în care se realizează aceasta;
- alta orientată asupra fenomenelor fizice care au loc în timpul procesului, în condiții de aplicare efectivă industrială.

Lucrarea a demonstrat că cele două direcții de cercetare se întrepătrund prin programul de cercetare științifică teoretică și experimentală.

Activitatea de cercetare științifică doctorală a întreprins un program experimental complex, original, care a permis evaluarea efectelor interacțiunilor ce au loc între parametrii modificați la decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel nealiat, optimizând procesul tehnologic la decuparea cu fascicul laser asistată de oxigen, stabilind ca obiectiv general, rezolvarea problemelor legate de modul de interacțiune între parametrii funcționali și factorii de influență, prin abordări teoretice și modelări analitice ale proceselor fizice specifice.

La tăierea laser asistată de oxigen au fost definite și utilizate trei seturi de parametrii independenți:

- parametrii legați de fasciculul laser;
- parametrii legați de jetul de oxigen;
- parametrii aferenți sistemului de coordonate care asigură mișcarea relativă dintre capul laser și piesă.

Toți acești parametrii concurează pentru realizarea tăieturii. Cercetarea procesului a fost însoțită și de cercetări asupra materialului. Cercetarea experimentală a procesului de tăiere laser asistată de oxigen este în acest context un subiect actual și permanent.

Principalele concluzii ale cercetării științifice fundamentate pe baza analizelor, evaluărilor și concluziilor cercetării experimentale, a modelelor matematice realizate și a rezultatelor obținute la prelucrările industriale efective de decupare cu fascicul laser, au fost aplicate la S.C. „Compa” S.A. Sibiu. Astfel, au fost asigurate posibilități de extindere a domeniului optimizat la alte materiale metalice prelucrate precum table din oțel nealiat de alte grosimi sau oțeluri aliate.

Autorul a studiat un număr de peste 160 de lucrări de specialitate naționale și internaționale, cărți, articole, referate și teze în domeniul decupării cu fascicul laser a diferitelor materiale, în special materiale metalice din oțel aliat și nealiat și a citat în cadrul referințelor și notelor bibliografice un număr de 68 de lucrări, din care 14 lucrări de specialitate publicate aparțin autorului. De remarcat, în cadrul lucrărilor de specialitate publicate și citate de autor, s-a enunțat și lucrarea publicată în cadrul Revistei METALURGIA INTERNATIONAL (cod CNCSIS 480), (ISSN 1582-2214), acreditată de CNCSIS la „Reviste categoria A – cotate ISI”, nr. 1/ 2011, pag. 18 - 25.

Studiul materialelor de specialitate, evaluarea, clasificarea și analiza conținutului acestora, interpretarea din punctul de vedere al autorului, precum și citarea corespunzătoare în prezenta lucrare de cercetare științifică, se consideră un element de originalitate și de contribuție personală.

Pe domeniul cercetării experimentale, principalele probleme abordate și finalizate sunt:

- caracteristicile fizice ale fascicolului laser (monocromaticitatea, coerența, direcționalitatea, strălucirea, modurile electromagnetice transversale și focalizarea fascicolului laser);
- sistemele tehnologice laser cu CO<sub>2</sub>;
- producerea și transmiterea fascicolului laser;
- caracteristicile fascicolului laser și producerea acestuia în sistemele tehnologice laser;
- tăierea laser aplicată materialelor metalice: după îndepărtarea materialului (tăierea laser de evaporare, tăierea laser prin topire), după tehnologia folosită în proces (tăierea laser folosind un gaz inert, tăierea laser folosind un gaz reactiv, folosirea oxigenului la tăierea oțelurilor);
- evaluarea fenomenelor fizice ale frontului de eroziune, cu diferitele zone în prezența reacției de oxidare.

Cercetările în domeniul proceselor de tăiere laser au loc folosind prescripții bazate pe programe experimentale. Astfel, cercetarea în domeniul tăierii laser are o componentă cu aplicabilitate directă – *cercetarea experimentală*. Aceasta a fost simultan însoțită de abordări teoretice finalizate cu modelare analitică care conduc la o mai bună înțelegere a procesului tehnologic.

Programul de cercetare doctorală a evidențiat evoluția sistemelor tehnologice laser, caracteristicile fascicolului laser asistat de CO<sub>2</sub>, tipurile de tăiere laser, definirea frontului de eroziune a materialului de prelucrat și aspecte legate de efectul oxigenului ca și gaz asistent. Prin aceasta s-au stabilit elementele care intervin în tăierea laser cu oxigen și s-au arătat principalele probleme legate de procesul de tăiere laser.

Teza prezintă sinteza asupra metodelor de cercetare în decuparea cu fascicul laser a tablelor din oțel, metode de analiză matematică a rezultatelor experimentale, semnificativ corelate între ele și punerea în evidență a aspectelor fenomenologice și tehnologice ale procesului de decupare cu fascicul laser. Studiul experimental al procesului de decupare cu fascicul laser realizat și prezentat în teza de doctorat, permite evidențierea unor necesități elementare ale procesului tehnologic la decuparea cu fascicul laser și transformărilor induse în material adiacent.

Teza evidențiază aspecte de interes fenomenologic asupra fenomenelor care au loc în tăierea cu fascicul laser:

- presiunea oxigenului  $pO_2$  are o influență directă asupra vitezei gazului în tăietură și asupra reacției chimice de ardere a materialului, puterea medie  $P$ , viteza de tăiere  $v$ , ciclul  $\eta$  și frecvența pulsurilor  $f$ , influențează iradierea materialului;
- presiunea oxigenului  $pO_2$ , viteza de tăiere  $v$  și distanța diuză-piesă  $ddp$  influențează procesul de tăiere laser în general.

Prin cercetarea experimentală, teza evidențiază aspecte de interes tehnologic asupra procesului de decupare cu fascicul laser:

- combustia are loc la partea superioară a tăieturii și produce în această zonă o încălzire constantă, iar temperatura oxidului este din ce în ce mai ridicată pe

măsură ce oxidul curge, deoarece gradul său de oxidare crește prin trecerea de la FeO la Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

- creșterea temperaturii este principala cauză a înclinării neregularităților micrometrice în tăietură;
- stabilitatea procesului și calitatea tăieturii necesită un debit de oxigen constant și suficient peste toată înălțimea tăieturii;
- creșterea diametrului diuzei provoacă turbulențe care afectează calitatea tăieturii, mărește gradientii de densitate din gaz și provoacă riscul instabilității punctului focal.

Corelat cu obiectivele programului de cercetare, au fost realizate experimentări și s-au pus în evidență de către autor următoarele:

- analizarea seriilor experimentale de tip clasic apelându-se la metoda de reprezentare cu funcții de regresie;
- analiza dependenței funcțiilor obiectiv pe baza experimentelor de tip factorial prin analiza planului experimental factorial complet 2<sup>5</sup> E1 și a planului experimental factorial incomplet 2<sup>5-2</sup> E2;
- analiza eficienței la îndepărtarea materialului care caracterizează procesul de tăiere în raport cu parametrii modificați;
- analiza procesul de tăiere din punct de vedere energetic, folosind rezultatele experimentale obținute;
- analiza efectelor condițiilor de iradiere asupra lățimii tăieturii;
- analiza condițiilor în care procesul de decupare nu se realizează;
- analiza variației funcțiilor obiectiv pe baza experimentelor de tip factorial prin desfășurarea analizei planului experimental factorial complet 2<sup>5</sup> E1, realizându-se ierarhizarea factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia prin diagramele PARETO standardizate și formulele de corelație rezultate între funcțiile obiectiv și factorii de influență;
- analiza planului experimental factorial incomplet 2<sup>5-2</sup> E2 în care numai una din condițiile experimentale a fost modificată, mărimind distanța dintre diuză și piesă de la 1mm la 2mm;
- analiza prin metoda corelației în produs pentru planul factorial incomplet 2<sup>5-2</sup> E2;
- analiza eficienței  $Q$  la îndepărtarea materialului funcție de raportul dintre energia liniară consumată în proces  $E_l$ , secțiunea prin tăietură  $A_s$  și randamentul procesului  $\varepsilon$  definit.

În cadrul cercetărilor experimentale efectuate, s-a întrebuițat, fără restricție, sistemul tehnologic industrial Mazak 1500 W. Au fost executate 120 de decupări cu fascicul laser, cu modificarea parametrilor: presiune oxigenului  $pO_2$  [MPa], puterea medie  $P$  [W], viteza de tăiere  $v$  [mm/min], frecvența pulsurilor  $f$  [Hz], ciclul  $\eta$  [%] și distanța diuză-piesă  $ddp$  [mm], în limitele constructive și de siguranță acceptate de sistemului tehnologic industrial întrebuițat.

Cercetarea experimentală s-a derulat în condițiile industriale oferite de S.C. „Compa” S.A. Sibiu, cu respectarea normelor de protecție a mediului, a normelor de securitate și sănătate în muncă, fără perturbarea activității de producție în hala industrială a sistemelor tehnologice laser.

Pe durata cercetărilor experimentale a fost planificat, organizat și realizat un program de fotografiere digitală a experimentelor și un plan de realizare a filmărilor video digitale în format HD, ca bază de date digitală a principalelor evenimente, asigurând astfel, transabilitatea și conservarea culegerii de date, posibilitatea executării confruntării și verificării probelor și seriilor experimentale.

Prin crearea unei baze fotografice și video digitalizate a experimentelor realizate, se asigură un fond de documentare modern, cu posibilități de întrebuințare ca material didactic adresat studenților și cadrelor didactice din instituțiile civile și militare de învățământ superior și inginerilor interesați de studiul tehnologiilor laser.

Rezultatele prezentei cercetări științifice sunt aplicate cu succes în procesul tehnologic de decupare cu fascicul laser asistat de oxigen a tablelor din oțel nealiat, la S.C. „Compa” S.A. Sibiu.

### **6.3. Perspective ale continuării cercetării științifice în domeniul tăierii laser asistate de oxigen**

În urma rezultatelor cercetărilor experimentale din prezenta teză, în vederea creșterii timpului de funcționare a tubului de focalizare, se consideră oportun continuarea cercetărilor în următoarele direcții principale:

- dezvoltarea unui model matematic pentru modelarea fenomenului de tăiere laser la materiale cu prelucrabilitate dificilă;
- extinderea aplicării metodologiei de cercetare experimentală folosind planurile de experimentare factorială la studiul altor materiale;
- elaborarea de programe de cercetare prin metoda experimentelor factoriale complete de ordinul superior, cu implicarea mai multor factori de influență;
- aplicarea cu prioritate a rezultatelor obținute până în prezent în procesările laser pe domeniul producției de armament în cadrul industriei naționale de apărare;
- elaborarea de programe de cercetare și continuarea cercetărilor științifice și experimentale ale autorului în domeniul producției de armament în cadrul industriei naționale de apărare.

# **A N E X E**

## ANEXA 1 MĂRIMI MĂSURATE ȘI CALCULATE

Taba nr. A1.1. Partea 1 – Măsurători pentru lățimea tăieturii

Încercarea	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 2cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 5cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea superioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea superioară a piesei [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 2cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 5cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea inferioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea inferioară a piesei [mm]
1	0.35	0.38	0.44	<b>0.39</b>	0.0458	0.26	0.27	0.33	<b>0.286</b>	0.0378
2	0.44	0.46	0.48	<b>0.46</b>	0.02	0.31	0.33	0.32	<b>0.32</b>	0.01
3	0.42	0.43	0.48	<b>0.443</b>	0.0321	0.26	0.28	0.32	<b>0.286</b>	0.0305
4	0.55	0.52	0.50	<b>0.523</b>	0.0251	0.35	0.35	0.33	<b>0.343</b>	0.0115
5	0.43	0.43	0.43	<b>0.43</b>	0	0.23	0.22	0.21	<b>0.22</b>	0.01
6	0.30	0.32	0.31	<b>0.31</b>	0.01	0	0	0	<b>0</b>	0
7	0.32	0.34	0.36	<b>0.34</b>	0.02	0.53	0.58	0.71	<b>0.606</b>	0.0929
8	0.38	0.40	0.40	<b>0.393</b>	0.0115	0.34	0.33	0.32	<b>0.33</b>	0.01
9	0.43	0.42	0.42	<b>0.423</b>	0.0057	0.41	0.37	0.39	<b>0.39</b>	0.02
10	0.50	0.47	0.46	<b>0.476</b>	0.0208	0.39	0.38	0.37	<b>0.38</b>	0.01
11	0.54	2.23	1.94	<b>1.57</b>	0.9037	1.23	2.04	2.04	<b>1.77</b>	0.4676
12	0.71	0.67	0.59	<b>0.656</b>	0.0611	0.51	0.48	0.42	<b>0.47</b>	0.0458
13	0.41	0.46	0.51	<b>0.46</b>	0.05	0.31	0.32	0.34	<b>0.323</b>	0.0152
14	0.46	0.49	0.48	<b>0.476</b>	0.0152	0.41	0.41	0.38	<b>0.4</b>	0.0173
15	0.35	0.43	0.45	<b>0.41</b>	0.0529	0.40	0.41	0.41	<b>0.406</b>	0.0057
16	0.53	0.54	0.53	<b>0.533</b>	0.0057	0.63	0.51	0.44	<b>0.526</b>	0.0960
17	0.53	0.54	0.53	<b>0.533</b>	0.0057	0.52	0.44	0.45	<b>0.47</b>	0.0435
18	0.52	0.55	0.52	<b>0.53</b>	0.0173	0.42	0.40	0.41	<b>0.41</b>	0.01
19	0.51	0.51	0.51	<b>0.51</b>	0	0.41	0.43	0.41	<b>0.416</b>	0.0115
20	0.50	0.49	0.50	<b>0.496</b>	0.0057	0.35	0.36	0.36	<b>0.356</b>	0.0057
21	0.34	0.31	0.32	<b>0.323</b>	0.0152	0	0	0	<b>0</b>	0
22	0.36	0.38	0.38	<b>0.373</b>	0.0115	1.25	1.21	1.23	<b>1.23</b>	0.02
23	0.44	0.47	0.46	<b>0.456</b>	0.0152	0.56	0.73	0.66	<b>0.65</b>	0.0854
24	0.42	0.45	0.45	<b>0.44</b>	0.0173	0.74	0.77	0.61	<b>0.706</b>	0.0850
25	0.41	0.43	0.48	<b>0.44</b>	0.0360	0.31	0.31	0.33	<b>0.316</b>	0.0115
26	0.50	0.50	0.50	<b>0.5</b>	0	0.43	0.41	0.43	<b>0.423</b>	0.0115
27	0.45	0.45	0.45	<b>0.45</b>	0	0.32	0.32	0.33	<b>0.323</b>	0.0057
28	0.54	0.53	0.52	<b>0.53</b>	0.01	0.38	0.38	0.36	<b>0.373</b>	0.0115
29	0.37	0.37	0.36	<b>0.366</b>	0.0057	0	0	0	<b>0</b>	0
30	0.41	0.41	0.43	<b>0.416</b>	0.0115	0.36	0.36	0.38	<b>0.366</b>	0.0115
31	0.49	0.48	0.48	<b>0.483</b>	0.0057	0.41	0.41	0.43	<b>0.416</b>	0.0115
32	0.94	1.02	0.98	<b>0.98</b>	0.04	1.06	1.03	1.46	<b>1.183</b>	0.2400
33	0.68	0.62	0.59	<b>0.63</b>	0.0458	0.54	0.50	0.47	<b>0.503</b>	0.0351
34	0.52	0.51	0.51	<b>0.513</b>	0.0057	0.48	0.45	0.43	<b>0.453</b>	0.0251
35	0.51	0.51	0.52	<b>0.513</b>	0.0057	0.46	0.51	0.48	<b>0.483</b>	0.0251
36	0.48	0.50	0.51	<b>0.496</b>	0.0152	0.54	0.53	0.52	<b>0.53</b>	0.01
37	0.42	0.42	0.44	<b>0.426</b>	0.0115	0.34	0.39	0.41	<b>0.38</b>	0.0360
38	0.38	0.38	0.39	<b>0.383</b>	0.0057	1.03	0.76	0.73	<b>0.84</b>	0.1652
39	0.36	0.39	0.41	<b>0.386</b>	0.0251	0.38	0.39	0.40	<b>0.39</b>	0.01
40	0.44	0.45	0.46	<b>0.45</b>	0.01	0.38	0.37	0.38	<b>0.376</b>	0.0057

Tabel nr. A1.1. Partea 2 – Măsurători pentru lățimea tăieturii

Încercarea	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 2cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 5cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea superioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea superioară a piesei [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 2cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 5cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea inferioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea inferioară a piesei [mm]
41	0.43	0.44	0.45	<b>0.44</b>	0.01	0.32	0.32	0.33	<b>0.323</b>	0.0057
42	0.44	0.44	0.44	<b>0.44</b>	0	0.43	0.37	0.36	<b>0.386</b>	0.0378
43	0.44	0.45	0.46	<b>0.45</b>	0.01	0.35	0.35	0.36	<b>0.353</b>	0.0057
44	0.45	0.45	0.45	<b>0.45</b>	0	0.71	0.70	0.60	<b>0.67</b>	0.0608
45	0.42	0.42	0.44	<b>0.426</b>	0.0115	1.08	0.99	1.27	<b>1.113</b>	0.1429
46	0.33	0.37	0.36	<b>0.353</b>	0.0208	0	0	0	<b>0</b>	0
47	0.45	0.47	0.47	<b>0.463</b>	0.0115	0.33	0.36	0.35	<b>0.346</b>	0.0152
48	0.21	0.36	0.35	<b>0.306</b>	0.0838	0	0	0	<b>0</b>	0
49	0.44	0.46	0.46	<b>0.453</b>	0.0115	0.34	0.35	0.36	<b>0.35</b>	0.01
50	0.46	0.47	0.47	<b>0.466</b>	0.0057	0.36	0.35	0.36	<b>0.356</b>	0.0057
51	0.48	0.48	0.48	<b>0.48</b>	0	0.41	0.40	0.38	<b>0.396</b>	0.0152
52	0.49	0.49	0.50	<b>0.493</b>	0.0057	0.35	0.38	0.39	<b>0.373</b>	0.0208
53	0.45	0.45	0.46	<b>0.453</b>	0.0057	0.37	0.32	0.30	<b>0.33</b>	0.0360
54	0.44	0.44	0.44	<b>0.44</b>	0	0.71	0.72	0.69	<b>0.706</b>	0.0152
55	0.48	0.48	0.47	<b>0.476</b>	0.0057	0.32	0.33	0.33	<b>0.326</b>	0.0057
56	0.42	0.46	0.48	<b>0.453</b>	0.0305	0.86	0.88	0.84	<b>0.86</b>	0.02
57	0.42	0.40	0.39	<b>0.403</b>	0.0152	0.34	0.34	0.34	<b>0.34</b>	0
58	0.40	0.39	0.40	<b>0.396</b>	0.0057	0.75	0.71	0.72	<b>0.726</b>	0.0208
59	0.48	0.46	0.46	<b>0.466</b>	0.0115	0.65	0.65	0.62	<b>0.64</b>	0.0173
60	0.31	0.31	0.37	<b>0.33</b>	0.0346	0.88	0.87	0.89	<b>0.88</b>	0.01
61	0.58	0.43	0.50	<b>0.503</b>	0.0750	0	0	0	<b>0</b>	0
62	0.31	0.31	0.31	<b>0.31</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0
63	0.74	0.89	0.70	<b>0.776</b>	0.1001	0	0	0	<b>0</b>	0
64	0.94	1.05	1	<b>0.996</b>	0.0550	0	0	0	<b>0</b>	0
65	0.41	0.46	0.42	<b>0.43</b>	0.0264	0.23	0.25	0.25	<b>0.243</b>	0.0115
66	0.46	0.45	0.43	<b>0.446</b>	0.0152	0.29	0.28	0.28	<b>0.283</b>	0.0057
67	0.44	0.43	0.45	<b>0.44</b>	0.01	0.27	0.27	0.26	<b>0.266</b>	0.0057
68	0.46	0.46	0.45	<b>0.456</b>	0.0057	0.27	0.27	0.28	<b>0.273</b>	0.0057
69	0.38	0.38	0.38	<b>0.38</b>	0	0.27	0.27	0.27	<b>0.27</b>	0
70	0.35	0.36	0.36	<b>0.356</b>	0.0057	0.32	0.32	0.29	<b>0.31</b>	0.0173
71	1.05	0.58	0.50	<b>0.71</b>	0.2971	0	0	0	<b>0</b>	0
72	0.46	0.46	0.46	<b>0.46</b>	0	0.82	0.83	0.85	<b>0.833</b>	0.0152
73	0.43	0.45	0.45	<b>0.443</b>	0.0115	0.33	0.31	0.32	<b>0.32</b>	0.01
74	0.46	0.45	0.42	<b>0.443</b>	0.0208	0.32	0.32	0.32	<b>0.32</b>	0
75	0.43	0.43	0.43	<b>0.43</b>	0	0.30	0.31	0.31	<b>0.306</b>	0.0057
76	0.45	0.46	0.46	<b>0.456</b>	0.0057	0.32	0.31	0.32	<b>0.316</b>	0.0057
77	0.48	0.48	0.49	<b>0.483</b>	0.0057	0.34	0.33	0.33	<b>0.333</b>	0.0057
78	0.48	0.49	0.49	<b>0.486</b>	0.0057	0.44	0.45	0.44	<b>0.443</b>	0.0057
79	0.48	0.49	0.50	<b>0.49</b>	0.01	0.46	0.50	0.47	<b>0.476</b>	0.0208
80	0.38	0.40	0.40	<b>0.393</b>	0.0115	0	0	0	<b>0</b>	0

Tabel nr. A1.1. Partea 3 – Măsurători pentru lățimea tăieturii

Încercarea	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 2cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 5cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea superioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea superioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea superioară a piesei [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 2cm de la începutul tăieturii [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 5cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea tăieturii la partea inferioară măsurată la 8cm de la intrarea în piesă [mm]	Lățimea medie la partea inferioară (media) [mm]	Dispersia între cele trei măsurători la partea inferioară a piesei [mm]
81	0.38	0.38	0.38	<b>0.38</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0
82	0.47	0.47	0.46	<b>0.466</b>	0.0057	0.34	0.33	0.33	<b>0.333</b>	0.0057
83	0.46	0.46	0.47	<b>0.463</b>	0.0057	0.32	0.34	0.35	<b>0.336</b>	0.0152
84	0.55	0.51	0.51	<b>0.523</b>	0.0230	0.31	0.31	0.31	<b>0.31</b>	0
85	0.43	0.45	0.45	<b>0.443</b>	0.0115	0.42	0.41	0.41	<b>0.413</b>	0.0057
86	0.49	0.49	0.49	<b>0.49</b>	0	0.38	0.38	0.37	<b>0.376</b>	0.0057
87	0.42	0.45	0.42	<b>0.43</b>	0.0173	0	0	0	<b>0</b>	0
88	0.57	0.55	0.56	<b>0.56</b>	0.01	0.43	0.41	0.42	<b>0.42</b>	0.01
89	0.59	0.54	0.50	<b>0.543</b>	0.0450	0.57	0.53	0.48	<b>0.526</b>	0.0450
90	0.46	0.46	0.44	<b>0.453</b>	0.0115	0.66	0.56	0.54	<b>0.586</b>	0.0642
91	0.38	0.41	0.42	<b>0.403</b>	0.0208	0.52	0.52	0.59	<b>0.543</b>	0.0404
92	0.54	0.50	0.49	<b>0.51</b>	0.0264	0.47	0.42	0.41	<b>0.433</b>	0.0321
93	0.51	0.49	0.49	<b>0.496</b>	0.0115	0.37	0.36	0.36	<b>0.363</b>	0.0057
94	0.64	0.58	0.56	<b>0.593</b>	0.0416	0.48	0.43	0.43	<b>0.446</b>	0.0288
95	0.62	0.57	0.53	<b>0.573</b>	0.0450	0.45	0.44	0.41	<b>0.433</b>	0.0208
96	0.64	0.64	0.63	<b>0.636</b>	0.0057	0.50	0.50	0.50	<b>0.5</b>	0
97	0.51	0.51	0.52	<b>0.513</b>	0.0057	0.43	0.41	0.41	<b>0.416</b>	0.0115
98	0.50	0.51	0.51	<b>0.506</b>	0.0057	0.39	0.39	0.44	<b>0.406</b>	0.0288
99	1.3	0.66	1.25	<b>1.07</b>	0.3559	1.59	1.21	1.50	<b>1.433</b>	0.1985
100	1.28	0.89	1.23	<b>1.133</b>	0.2122	2.03	1.92	2.20	<b>2.05</b>	0.1410
101	0.55	0.53	0.48	<b>0.52</b>	0.0360	0.43	0.37	0.31	<b>0.37</b>	0.06
102	0.42	0.43	0.46	<b>0.436</b>	0.0208	0.27	0.27	0.27	<b>0.27</b>	0
103	0.46	0.45	0.42	<b>0.443</b>	0.0208	0.29	0.28	0.25	<b>0.273</b>	0.0208
104	0.41	0.41	0.43	<b>0.416</b>	0.0115	0.25	0.26	0.26	<b>0.256</b>	0.0057
105	0.45	0.45	0.43	<b>0.443</b>	0.0115	0.28	0.28	0.28	<b>0.28</b>	0
106	0.47	0.47	0.46	<b>0.466</b>	0.0057	0.70	0.75	0.74	<b>0.73</b>	0.0264
107	0.47	0.47	1.09	<b>0.676</b>	0.3579	0.74	1.06	1.10	<b>0.966</b>	0.1973
108	0.44	1.24	1.24	<b>0.973</b>	0.4618	0.66	1.45	1.21	<b>1.106</b>	0.4050
109	0.54	1.26	1.25	<b>1.016</b>	0.4128	0.86	1.71	1.63	<b>1.4</b>	0.4693
110	0.54	1.21	1.21	<b>0.986</b>	0.3868	1.60	1.65	1.81	<b>1.686</b>	0.1096
111	0.55	0.54	0.52	<b>0.536</b>	0.0152	0.45	0.47	0.47	<b>0.463</b>	0.0115
112	0.55	0.52	0.55	<b>0.54</b>	0.0173	0.99	1.16	0.87	<b>1.006</b>	0.1457
113	1.58	1.49	1.55	<b>1.54</b>	0.0458	1.11	0.67	0.85	<b>0.876</b>	0.2212
114	1.62	1.57	1.63	<b>1.606</b>	0.0321	2.40	2.58	2.75	<b>2.576</b>	0.1750
115	1.42	1.60	1.26	<b>1.426</b>	0.1700	0	0	0	<b>0</b>	0
116	1.69	1.70	1.80	<b>1.73</b>	0.0608	2.13	1.93	2.03	<b>2.03</b>	0.1
117	0.71	1.14	0.87	<b>0.906</b>	0.2173	0.73	0.80	0.79	<b>0.773</b>	0.0378
118	1.74	1.78	1.78	<b>1.766</b>	0.0230	1.51	1.54	1.52	<b>1.523</b>	0.0152
119	1.73	1.84	1.72	<b>1.763</b>	0.0665	0.22	0.82	1.14	<b>0.726</b>	0.4670
120	2.89	1.53	2.35	<b>2.256</b>	0.6847	0	0	0	<b>0</b>	0



Tabel nr. A1.2. - Partea 1 - Valori calculate cu randamente și eficiența  
1 Incercarea 2  $\varepsilon_1$  [%] 3  $\varepsilon_2$  [%] 4  $\varepsilon_3$  [%] 5  $Q$  [J/mm<sup>3</sup>]

<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
1	52.9	17.3	20.3	35.5	31	88	28.8	24	21.3
2	61.1	20	21.5	30.7	32	20.3	6.6	12.6	92.4
3	57.1	18.7	20.9	32.9	33	46.1	15.1	19.3	40.7
4	67.8	22.2	22.2	27.7	34	90.8	29.7	24.3	20.7
5	50.9	16.6	20	36.9	35	78	25.5	23.2	24
6	121.4	39.8	26	15.4	36	80.4	26.3	23.4	23.3
7	222.4	72.9	28.8	8.4	37	63.1	20.6	21.7	29.7
8	106.2	34.8	25.2	17.7	38	95.8	31.4	24.5	19.6
9	95.5	31.3	24.6	19.6	39	60.8	19.9	21.4	30.9
10	83.8	27.4	23.7	22.4	40	64.7	21.2	21.9	29
11	31.4	10.2	16.1	59.8	41	71.7	23.5	22.6	26.2
12	28.2	9.2	15.2	66.6	42	77.6	25.4	23.2	24.2
13	31.9	10.4	16.2	58.9	43	75.5	24.7	23	24.9
14	82.3	26.9	23.6	22.8	44	105.3	34.5	25.2	17.8
15	102.3	33.5	25	18.3	45	144.7	47.7	26.8	12.9
16	82.9	27.1	23.7	22.6	46	33.1	10.8	16.5	56.6
17	78.6	25.7	23.3	23.9	47	76	24.9	23	24.7
18	73.6	24.1	22.8	25.5	48	28.7	9.4	15.4	65.3
19	72.5	23.7	22.7	25.9	49	32.7	10.7	16.4	57.4
20	66.7	21.8	22.1	28.1	50	33.4	10.9	16.6	56.1
21	25.3	8.3	14.3	74.3	51	35.6	11.6	17.1	52.6
22	125.6	41.5	26	14.9	52	35.2	11.5	17	53.2
23	86.6	28.4	23.9	21.6	53	31.9	10.4	16.2	58.9
24	89.8	29.4	24.2	20.9	54	46.7	15.3	19.3	40.2
25	59.2	19.4	21.2	31.7	55	32.6	10.7	16.4	57.5
26	72.3	23.7	22.7	26	56	53.5	17.5	20.4	35.1
27	60.5	19.8	21.4	31	57	131	42.9	26.4	14.3
28	70.7	23.1	22.5	26.5	58	197.8	64.9	28.3	9.5
29	143.4	47	26.9	13.1	59	195	63.9	28.3	9.6
30	114.9	37.6	25.7	16.3	60	213.3	70.1	28.6	8.8

Tabel nr. A1.2 Partea 2 – Valori calculate cu randamente și eficiența  
 1 Incercarea 2  $\varepsilon_1$ [%] 3  $\varepsilon_2$ [%] 4  $\varepsilon_3$ [%] 5 Q [J/mm<sup>3</sup>]

<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
61	88.6	29.1	24	21.2	91	166.8	54.6	27.6	11.2
62	54.6	17.9	20.6	34.4	92	72	23.6	22.7	26.1
63	136.8	45.2	26.5	13.7	93	65.6	21.5	22	28.6
64	175.6	58.3	27.5	10.7	94	93.2	30.5	24.4	20.1
65	51.4	16.8	20.1	36.5	95	90.3	29.5	24.2	20.8
66	55.7	18.2	20.7	33.7	96	32	10.5	16.2	58.6
67	53.9	17.6	20.5	34.8	97	26.2	8.5	14.6	71.7
68	55.7	18.2	20.7	33.7	98	25.7	8.4	14.4	73
69	49.6	16.2	19.8	37.8	99	70.6	23.1	22.5	26.6
70	50.8	16.6	20	36.9	100	89.8	29.7	24	20.9
71	54.2	17.8	20.4	34.6	101	53.8	17.6	20.5	34.9
72	98.7	32.4	24.8	19	102	42.6	13.9	18.6	44
73	68.4	22.4	22.3	27.4	103	43.2	14.1	18.7	43.3
74	68.4	22.4	22.3	27.4	104	40.6	13.3	18.2	46.2
75	66	21.6	22	28.4	105	43.7	14.3	18.8	42.9
76	69.3	22.7	22.4	27.1	106	33.7	11	16.7	55.7
77	73.2	24	22.8	25.6	107	46.3	15.1	19.3	40.6
78	19.8	6.5	12.4	94.7	108	58.6	19.2	21.1	32
79	20.6	6.7	12.7	91	109	68.1	22.3	22.2	27.5
80	67.1	22	22.1	27.9	110	75.3	24.8	22.9	24.9
81	64.9	21.3	21.9	28.9	111	9.3	3	7.3	200.2
82	34.1	11.1	16.8	55	112	29	9.5	15.4	64.6
83	34.1	11.1	16.8	55	113	90.8	29.9	24.1	20.6
84	89	29.1	24.1	21.1	114	196.6	65.2	28	9.5
85	91.4	29.9	24.3	20.5	115	111.7	37.6	25	16.8
86	81.4	26.6	23.5	23	116	35.3	11.5	17.1	53.1
87	40.4	13.2	18.1	46.5	117	31.5	10.3	16.1	59.5
88	39.9	13	18.1	47	118	123.7	40.5	26.1	15.2
89	43.5	14.2	18.8	43.1	119	117	38.9	25.5	16
90	183.2	60	28	10.2	120	176.8	61.8	26.4	10.6

Tabel nr. A 1.3. Partea 1 – Tabel cu mărimi folosite în calcule  
 1 Incercarea 2  $A_s$ [mm<sup>2</sup>] 3  $A_f$ [mm<sup>2</sup>] 4  $P_u$ [W] 5  $P_{in}$  [W] 6  $P_{out}$  [W]

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1.014	1.5922	794.6	260.3	2395.6	31	1.3485	2.1172	1056.8	346.2	3185.6
2	1.17	1.8374	916.9	300.4	2764.5	32	3.2445	5.0967	305.1	100	920.2
3	1.0935	1.7173	856.9	280.8	2583.9	33	1.6995	2.6688	692.5	226.9	2088
4	1.299	2.0403	1018	333.6	3069.8	34	1.449	2.2750	1362.6	446.4	4107.5
5	0.975	1.5316	764	250.4	2304.5	35	1.494	2.3456	1170.8	383.6	3529.1
6	0.465	0.7310	364.4	119.5	1099.8	36	1.539	2.4162	1206	395.1	3635.4
7	1.419	2.2300	1112	364.6	3355.2	37	1.209	1.8981	947.4	310.4	2855.9
8	1.0845	1.7027	849.9	278.4	2561.9	38	1.8345	2.8885	1437.6	472.3	4345.9
9	1.2195	1.9146	955.7	313.1	2880.7	39	1.164	1.8274	912.2	298.8	2749.5
10	1.284	2.0161	1006.2	329.7	3033.4	40	1.239	1.9453	970.9	318.1	2926.9
11	5.01	7.8700	471.1	154.4	1420.9	41	1.1445	1.7972	1076.3	352.6	3244.8
12	1.689	2.6530	423.5	138.8	1277.3	42	1.239	1.9453	1165.1	381.7	3512.2
13	1.1745	1.8444	478.6	156.8	1443	43	1.2045	1.8913	1132.7	371.1	3414.7
14	1.314	2.0631	1235.7	404.8	3725	44	1.68	2.6393	1579.9	517.9	4765.3
15	1.224	1.9216	1534.7	502.8	4626.1	45	2.3085	3.6480	2170.9	715.9	6586.5
16	1.5885	2.4939	1244.8	407.8	3752.3	46	0.5295	0.8327	497.9	163.4	1503.5
17	1.5045	2.3621	1179	386.3	3554.1	47	1.2135	1.9055	1141.2	373.9	3440.4
18	1.41	2.2141	1105	362.1	3331.3	48	0.459	0.7215	431.6	141.6	1302.7
19	1.389	2.1809	1088.5	356.6	3281.4	49	1.2045	1.8913	490.8	160.8	1479.7
20	1.278	2.0070	1001.5	328.2	3019.7	50	1.233	1.9361	502.4	164.6	1514.7
21	0.4845	0.7617	379.6	124.5	1146.1	51	1.314	2.0631	535.4	175.4	1614.1
22	2.4045	3.8133	1884.3	623.6	5737.5	52	1.299	2.0398	529.3	173.4	1595.9
23	1.659	2.6059	1300.1	426.1	3920.9	53	1.1745	1.8443	478.6	156.8	1442.9
24	1.719	2.7014	1347.1	441.8	4064.6	54	1.719	2.7014	700.5	229.7	2113.5
25	1.134	1.7807	888.7	291.2	2679.3	55	1.203	1.8893	490.2	160.6	1478.1
26	1.3845	2.1738	1085	355.5	3270.7	56	1.9695	3.0992	802.6	263.5	2424.7
27	1.1595	1.8208	908.6	297.7	2739.5	57	1.1145	1.7498	1048.1	343.4	3159.3
28	1.3545	2.1272	1061.5	347.8	3200.6	58	1.683	2.6463	1582.7	519.3	4777.8
29	0.549	0.8635	430.2	141.2	1299.2	59	1.659	2.6057	1560.1	511.3	4704.6
30	1.173	1.8416	919.2	301.1	2770.9	60	1.815	2.8614	1706.8	561.5	5166.4

Tabel A 1.3. Partea 2 – Tabel cu mărimi folosite în calcule  
 1 Încercarea 2  $A_s$ [mm<sup>2</sup>] 3  $A_f$ [mm<sup>2</sup>] 4  $P_u$  [W] 5  $P_{in}$  [W] 6  $P_{out}$  [W]

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
61	0.7545	1.1887	709.5	233.2	2146.2	91	1.419	2.2284	1334.4	437.3	4023.4
62	0.465	0.7310	437.2	143.4	1319.8	92	1.4145	2.2209	576.4	188.8	1737.6
63	1.164	1.8427	1094.6	361.6	3326.9	93	1.2885	2.0234	525	172	1583.1
64	1.494	2.3776	1404.9	466.6	4292.8	94	1.5585	2.4475	1025.9	336.2	3093.3
65	1.0095	1.5856	411.3	134.8	1240.6	95	1.509	2.3697	993.3	325.5	2995
66	1.0935	1.7174	445.6	146	1343.6	96	1.704	2.6759	480.7	157.5	1449.4
67	1.059	1.6633	431.5	141.4	1301.3	97	1.3935	2.1880	393.1	128.8	1185.1
68	1.0935	1.7175	445.6	146	1343.8	98	1.368	2.1480	385.9	126.4	1163.4
69	0.975	1.5310	397.3	130.1	1197.8	99	3.7545	5.9053	1059.2	347.6	3198.6
70	0.999	1.5684	407.1	133.3	1227.1	100	4.7745	7.5830	1347	446.4	4107.3
71	1.065	1.6837	434	143.1	1317.3	101	1.335	2.0966	376.6	123.4	1135.6
72	1.9395	3.0508	790.3	259.4	2386.9	102	1.059	1.663	298.7	97.9	900.9
73	1.1445	1.7972	753.4	246.8	2271.4	103	1.074	1.6868	303	99.3	913.6
74	1.1445	1.7972	753.4	246.8	2271.4	104	1.008	1.5831	284.3	93.2	857.4
75	1.104	1.7336	726.7	238.1	2191	105	1.0845	1.7032	305.9	100.2	922.5
76	1.158	1.8185	762.3	249.8	2298.3	106	1.794	2.8193	506.1	165.9	1527
77	1.224	1.9222	805.7	264	2429.4	107	2.463	3.8714	694.8	227.9	2096.9
78	1.3935	2.1878	218.4	71.5	658.3	108	3.1185	4.8972	879.8	288.3	2652.5
79	1.449	2.2749	227.1	74.4	684.5	109	3.624	5.7013	1022.4	335.6	3088.1
80	0.5895	0.9274	739.1	242.6	2232.7	110	4.008	6.335	1130.7	372.9	3431.4
81	0.57	0.8966	714.7	234.6	2158.6	111	1.4985	2.3528	140.9	46.1	424.8
82	1.1985	1.8821	375.7	123.1	1132.7	112	2.319	3.6517	436.1	143.3	1318.6
83	1.1985	1.8820	375.7	123.1	1132.6	113	3.624	5.7244	1363.2	449.3	4134.1
84	1.2495	1.9629	979.2	321	2953.4	114	6.273	9.9764	2949.6	978.9	9006.2
85	1.284	2.0159	1006.2	329.6	3033	115	2.139	3.4517	1676.3	564.5	5193.4
86	1.299	2.0397	1221.6	400.3	3682.8	116	5.64	8.8658	530.4	173.9	1600.7
87	0.645	1.0152	606.5	199.2	1833	117	2.5185	3.9550	473.6	155.2	1428.1
88	1.47	2.3085	599	196.3	1806.1	118	4.9335	7.7519	1855.8	608.5	5598.4
89	1.6035	2.5175	653.4	214	1969.6	119	3.7335	5.9484	1755.5	583.6	5370
90	1.5585	2.4474	1465.6	480.3	4418.8	120	3.384	5.6760	2652	928.2	8540

Tabel A1.4. nr. Partea 1 – Mărimi calculate pentru regimul pulsat și  
căldura latentă estimată

Tăietura	Raportul de paralelism $r[-]$	Raport Spo $[-]$	Puterea de vârf $P_c[W]$	Căldura latentă estimată $L [J/g]$	Tăietura	Raportul de paralelism $r[-]$	Raport spo $[-]$	Puterea de vârf $P_c[W]$	Căldura latentă estimată $L [J/g]$
1	0.266	0.58	1764	3286	31	0.138	0.58	1411	2624
2	0.304	0.58	1764	3286	32	0.17	0.95	1764	3286
3	0.354	0.58	1764	3286	33	0.201	0.78	1764	3286
4	0.344	0.58	1764	3286	34	0.116	0.5	1764	3286
5	0.488	0.58	1764	3286	35	0.058	-1.6	1764	8205
6	1	0.58	352	656	36	0.06	0.16	1764	4647
7	0.43	0.58	588	1095	37	0.107	0.65	1764	2981
8	0.160	0.58	941	1751	38	0.54	0.58	3000	4285
9	0.078	0.58	1176	2190	39	0.009	0.58	2142	3619
10	0.201	0.58	1411	2624	40	0.164	0.58	1578	3108
11	0.11	0.95	1764	3286	41	0.265	0.37	1764	3652
12	0.283	0.86	1764	3286	42	0.122	0.37	1764	3652
13	0.297	0.78	1764	3286	43	0.215	-0.66	1764	5963
14	0.159	0.5	1764	3286	44	0.32	-0.66	1764	5963
15	0.009	0.33	1764	3286	45	0.61	0.37	3000	4694
16	0.013	-1.6	1764	8205	46	1	0.37	3000	4694
17	0.118	-0.38	1764	5963	47	0.252	-0.66	3000	7785
18	0.226	0.16	1764	4647	48	1	-0.66	3000	7785
19	0.184	0.47	1764	3652	49	0.227	0.72	1764	3652
20	0.282	0.65	1764	2981	50	0.236	0.72	1764	3652
21	1	0.58	7500	6776	51	0.175	0.27	1764	5963
22	0.69	0.58	3000	4285	52	0.243	0.27	1764	5963
23	0.29	0.58	2500	3912	53	0.271	0.72	3000	4694
24	0.37	0.58	2142	3619	54	0.37	0.72	3000	4694
25	0.281	0.58	1578	3108	55	0.315	0.27	3000	7785
26	0.154	0.58	1764	3286	56	0.47	0.27	3000	7785
27	0.282	0.58	1764	3286	57	0.156	0.37	941	1946
28	0.296	0.58	1764	3286	58	0.45	0.37	941	1946
29	1	0.58	352	656	59	0.27	-0.66	941	3178
30	0.120	0.58	941	1751	60	0.62	-0.66	941	3178

Tabel A1.4. nr. Partea 2 – Mărimi calculate pentru regimul pulsat și căldura latentă estimată

Tăietura	Raportul de paralelism r[-]	Raport Spo [-]	Puterea de vârf P <sub>c</sub> [W]	Căldura latentă estimată L [J/g]	Tăietura	Raportul de paralelism r[-]	Raport spo [-]	Puterea de vârf P <sub>c</sub> [W]	Căldura latentă estimată L [J/g]
61	1	0.37	1600	2499	91	0.25	-0.66	941	3178
62	1	0.37	1600	2499	92	0.150	0.27	1600	4145
63	1	-0.66	1600	4145	93	0.268	0.72	941	1946
64	1	-0.66	1600	4145	94	0.247	0.3	1466	3625
65	0.434	0.72	941	1946	95	0.244	0.3	1466	3625
66	0.365	0.72	941	1946	96	0.213	0.85	1666	3194
67	0.395	0.27	941	3178	97	0.189	0.85	1666	3194
68	0.401	0.27	941	3178	98	0.197	0.85	1666	3194
69	0.289	0.72	1600	2499	99	0.25	0.85	1666	3194
70	0.129	0.72	1600	2499	100	0.44	0.85	1666	3194
71	1	0.27	1600	4145	101	0.288	0.85	777	1488
72	0.44	0.27	1600	4145	102	0.380	0.85	777	1488
73	0.277	0.3	1466	3625	103	0.383	0.85	777	1488
74	0.277	0.3	1466	3625	104	0.384	0.85	777	1488
75	0.288	0.3	1466	3625	105	0.367	0.85	777	1488
76	0.307	0.3	1466	3625	106	0.36	-2.75	3000	21428
77	0.310	0.3	1466	3625	107	0.29	-2.75	3000	21428
78	0.088	0.83	1466	3625	108	0.11	-2.75	3000	21428
79	0.028	0.83	1466	3625	109	0.27	-2.75	3000	21428
80	1	-0.33	1466	3625	110	0.41	-2.75	3000	21428
81	1	-0.33	1466	3625	111	0.136	-0.25	3000	21428
82	0.285	0.66	1466	3625	112	0.46	-1.5	3000	21428
83	0.274	0.66	1466	3625	113	0.431	-4	3000	21428
84	0.407	0.16	1466	3625	114	0.37	-5.25	3000	21428
85	0.067	0.16	1466	3625	115	1	-9.41	3000	21428
86	0.232	0.37	1764	3652	116	0.14	-0.25	3000	21428
87	1	-0.66	3000	7785	117	0.146	-1.5	3000	21428
88	0.25	0.27	1764	5963	118	0.137	-4	3000	21428
89	0.031	0.72	3000	4694	119	0.588	-5.25	3000	21428
90	0.22	0.37	1600	2499	120	1	-9.41	3000	21428

Tabel nr. A 1.5. – Variația durtății Vickers [HV1] funcție de profunzimea de la suprafața tăieturii, pentru probele analizate realizate la energii liniare diferite „Ad” – Adâncimea în raport cu suprafața la care s-a măsurat [mm], „Du” Duritatea Vickers [HV1]

Tăietura 11	E <sub>i</sub> [J/cm] 3000	Ad [mm]	0.09	0.19	0.34	0.49	0.64	0.79	1.29	1.79	2.79
		Du [HV1]	423	393	327	254	214	191	170	159	159
Tăietura 12	E <sub>i</sub> [J/cm] 1125	Ad [mm]	0.07	0.17	0.32	0.47	0.77	1.07	1.22	1.72	2.72
		Du [HV1]	405	371	228	194	182	168	153	153	153
Tăietura 13	E <sub>i</sub> [J/cm] 692	Ad [mm]	0.08	0.18	0.33	0.48	0.63	1.13	2.13		
		Du [HV1]	413	263	205	187	167	153	153		
Tăietura 16	E <sub>i</sub> [J/cm] 360	Ad [mm]	0.09	0.24	0.39	0.59	0.79	0.99			
		Du [HV1]	254	185	168	147	135	135			
Tăietura 17	E <sub>i</sub> [J/cm] 360	Ad [mm]	0.08	0.18	0.28	0.48	0.68	0.88			
		Du [HV1]	341	203	162	150	142	142			
Tăietura 30	E <sub>i</sub> [J/cm] 192	Ad [mm]	0.08	0.12	0.27	0.62	1.14				
		Du [HV1]	283	264	159	159	159				
Tăietura 31	E <sub>i</sub> [J/cm] 288	Ad [mm]	0.08	0.12	0.28	0.5	0.73	1.05			
		Du [HV1]	330	305	171	159	159	159			
Tăietura 106	E <sub>i</sub> [J/cm] 1000	Ad [mm]	0.095	0.18	0.33	0.53	0.88	1.2	1.6		
		Du [HV1]	305	283	197	151	133	148	148		
Tăietura 108	E <sub>i</sub> [J/cm] 1000	Ad [mm]	0.12	0.27	0.42	0.57	0.72	0.92	1.22	1.72	2.22
		Du [HV1]	205	256	153	148	143	140	133	133	133
Tăietura 109	E <sub>i</sub> [J/cm] 1000	Ad [mm]	0.08	0.18	0.21	0.48	0.8	1.09	1.5		
		Du [HV1]	358	312	219	162	156	156	156		
Tăietura 110	E <sub>i</sub> [J/cm] 1000	Ad [mm]	0.14	0.32	0.47	0.65	0.85	1.05	1.43		
		Du [HV1]	306	269	229	168	159	159	159		

## ANEXA 2

### METODA DE ANALIZĂ A VARIAȚIILOR ANOVA

*Tabel nr. A 2.1. – Tabel ANOVA pentru lățimea superioară  
Planul Factorial Complet E1 (effect - efectul; sum of squares - suma pătratelor;  
mean of squares – media pătratelor)*

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.0222	1	0.0222	53.18	0.00
B(viteza)	0.0007	1	0.0007	1.71	0.24
C(ciclul)	0.0229	1	0.0229	54.94	0.00
D(frecvența)	0.0739	1	0.0739	176.70	0.00
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.0114	1	0.0114	27.34	0.00
AB	0.0228	1	0.0228	54.64	0.00
AC	0.0631	1	0.0631	151.01	0.00
AD	0.0508	1	0.0508	121.57	0.00
AE	0.0003	1	0.0003	0.92	0.39
BC	0.0147	1	0.0147	35.16	0.00
BD	0.0047	1	0.0047	11.33	0.02
BE	0.0002	1	0.0002	0.57	0.49
CD	0.0548	1	0.0548	131.19	0.00
CE	0.0048	1	0.0048	11.65	0.01
DE	0.00002	1	0.00002	0.06	0.81
ABC	0.0328	1	0.0328	78.45	0.00
ABD	0.0118	1	0.0118	28.25	0.00
ABE	0.0035	1	0.0035	8.58	0.03
ACD	0.0640	1	0.0640	153.06	0.00
ACE	0.0004	1	0.0004	1.13	0.33
ADE	0.0006	1	0.0006	1.57	0.26
BCD	0.0092	1	0.0092	22.01	0.00
BCE	0.0023	1	0.0023	5.65	0.06
BDE	0.0057	1	0.0057	13.75	0.01
CDE	0.0011	1	0.0011	2.67	0.16
ABCD	0.0095	1	0.0095	22.84	0.00
ABCE	0.0143	1	0.0143	34.23	0.00
ABDE	0.0109	1	0.0109	26.09	0.00
ACDE	0.0661	1	0.0661	14.66	0.01
BCDE	0.0165	1	0.0165	39.47	0.00
ABCDE	0.0204	1	0.0204	48.88	0.00
Total error	0.0020	5	0.0004		
Total (corr)	0.5589	36			
$R^2 = 0.99$			$R^2 (adj. for d.f) = 0.97$		



Tabel nr. A 2.2. – Tabel ANOVA pentru lățimea la partea inferioară  
Planul Factorial Complet E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.1584	1	0.1584	26.58	0.00
B(viteza)	0.0178	1	0.0178	3.00	0.14
C(ciclul)	0.0492	1	0.0492	8.26	0.03
D(frecvența)	0.00003	1	0.00003	0.01	0.94
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.0302	1	0.0302	5.07	0.07
AB	0.0307	1	0.0307	5.16	0.07
AC	0.2941	1	0.2941	49.33	0.00
AD	0.0549	1	0.0549	9.22	0.02
AE	0.1388	1	0.1388	23.29	0.00
BC	0.5879	1	0.5879	98.59	0.00
BD	0.0003	1	0.0003	0.05	0.83
BE	0.1116	1	0.1116	18.72	0.00
CD	0.0755	1	0.0755	12.68	0.01
CE	0.0369	1	0.0369	6.20	0.05
DE	0.1431	1	0.1431	24.00	0.00
ABC	0.0740	1	0.0740	12.41	0.01
ABD	0.0071	1	0.0071	1.20	0.32
ABE	0.0529	1	0.0529	8.88	0.03
ACD	0.0420	1	0.0420	7.05	0.04
ACE	0.0691	1	0.0691	11.60	0.01
ADE	0.0259	1	0.0259	4.36	0.09
BCD	0.0691	1	0.0691	11.59	0.01
BCE	0.4612	1	0.4612	77.35	0.00
BDE	0.0047	1	0.0047	0.80	0.42
CDE	0.1310	1	0.1310	21.98	0.00
ABCD	0.0002	1	0.0002	0.05	0.83
ABCE	0.0274	1	0.0274	4.61	0.08
ABDE	0.0631	1	0.0631	10.60	0.02
ACDE	0.0003	1	0.0003	0.06	0.82
BCDE	0.0166	1	0.0166	2.79	0.15
ABCDE	0.0124	1	0.0124	2.08	0.20
Total error	0.0298	5	0.0059		
Total (corr)	2.8172				
$R^2 = 0.98$		$R^2(\text{adj. for d.f}) = 0.92$			

Tabel nr. A 2.3. – Tabel ANOVA pentru lăţimea medie  
Planul Factorial Complet E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.0158	1	0.0158	7.67	0.03
B(viteza)	0.0030	1	0.0030	1.49	0.27
C(ciclul)	0.013	1	0.013	0.66	0.46
D(frecvenţa)	0.0189	1	0.0189	9.14	0.02
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.00121	1	0.00121	0.62	0.47
AB	0.0273	1	0.0273	13.21	0.01
AC	0.0206	1	0.0206	9.96	0.02
AD	0.0538	1	0.0538	26.00	0.00
AE	0.0305	1	0.0305	14.74	0.01
BC	0.1030	1	0.1030	49.79	0.00
BD	0.0007	1	0.0007	0.37	0.57
BE	0.0310	1	0.0310	14.97	0.01
CD	0.003	1	0.003	0.17	0.69
CE	0.0177	1	0.0177	8.58	0.03
DE	0.0340	1	0.0340	16.45	0.00
ABC	0.0022	1	0.0022	1.07	0.34
ABD	0.0089	1	0.0089	4.34	0.09
ABE	0.0215	1	0.0215	10.40	0.02
ACD	0.0515	1	0.0515	24.90	0.00
ACE	0.0208	1	0.0208	10.05	0.02
ADE	0.0043	1	0.0043	2.11	0.20
BCD	0.0071	1	0.0071	3.46	0.12
BCE	0.0981	1	0.0981	47.40	0.00
BDE	0.00002	1	0.00002	0.01	0.91
CDE	0.397	1	0.397	19.21	0.00
ABCD	0.0035	1	0.0035	1.70	0.24
ABCE	0.0199	1	0.0199	9.61	0.02
ABDE	0.0057	1	0.0057	2.77	0.15
ACDE	0.0007	1	0.0007	0.38	0.57
BCDE	0.000003	1	0.000003	0.00	0.97
ABCDE	0.0003	1	0.0003	0.15	0.71
Total error	0.0103	5	0.0020		
Total (corr)	0.6549	36			
$R^2 = 0.98$		$R^2(\text{adj. for d.f}) = 0.88$			

Tabel nr. A 2.4. – Tabel ANOVA pentru lățimea superioară  
Planul factorial incomplet E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.0032	1	0.0032	0.87	0.41
B(viteza)	0.0148	1	0.0148	4.01	0.11
C(ciclul)	0.00002	1	0.00002	0.01	0.94
D(frecvența)	0.0001	1	0.0001	0.04	0.85
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.0024	1	0.0024	0.67	0.46
Total error	0.0148	4	0.0037		
Total (corr)	0.0359	9			
$R^2 = 0.58$			$R^2 (adj. for d.f) = 0.06$		

Tabel nr. A 2.5. – Tabel ANOVA pentru lățimea inferioară  
Planul factorial incomplet E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.0454	1	0.0454	2.83	0.16
B(viteza)	0.00004	1	0.00004	0.00	0.96
C(ciclul)	0.0023	1	0.0023	0.14	0.72
D(frecvența)	0.1031	1	0.1031	6.43	0.06
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.0204	1	0.0204	1.27	0.32
Total error	0.0641	4	0.0160		
Total (corr)	0.2359	9			
$R^2 = 0.72$			$R^2 (adj. for d.f) = 0.38$		

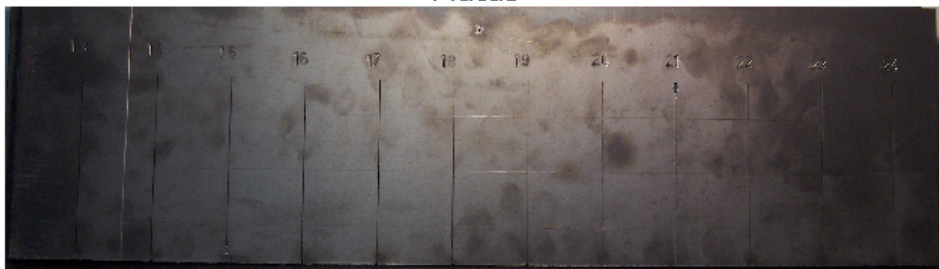
Tabel nr. A 2.6. – Tabel ANOVA pentru lățimea medie  
Planul factorial incomplet E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-val
A(puterea)	0.0060	1	0.0060	0.91	0.40
B(viteza)	0.0033	1	0.0033	0.50	0.52
C(ciclul)	0.0007	1	0.0007	0.11	0.76
D(frecvența)	0.0281	1	0.0281	4.23	0.10
E (presiune O <sub>2</sub> )	0.0093	1	0.0093	1.40	0.30
Total error	0.0266	4	0.0066		
Total (corr)	0.0771	9			
$R^2 = 0.65$			$R^2 (adj. for d.f) = 0.22$		

### **ANEXA 3 FOTOGRAFII ALE PLĂCILOR CU TĂIETURILE REALIZATE**

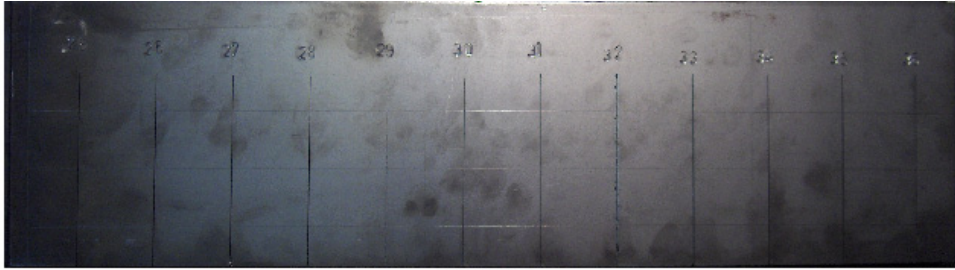


Placa 1

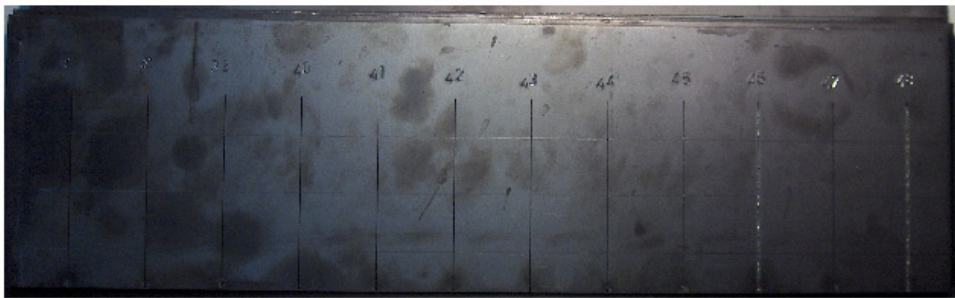


Placa 2

*Figura nr. A 3.1. - Plăcile 1 și 2*

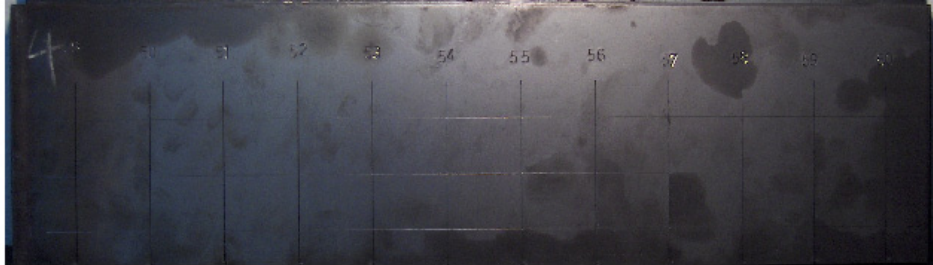


Placa3

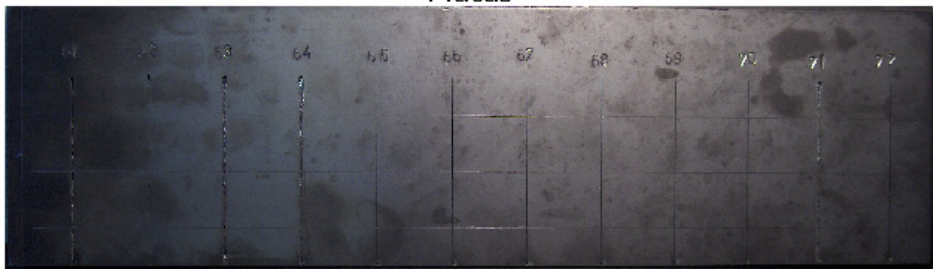


Placa 4

Figura nr. A 3.2. - Plăcile 3 și 4

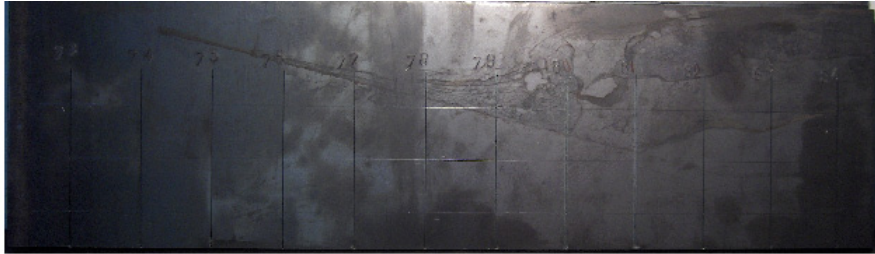


Placa5

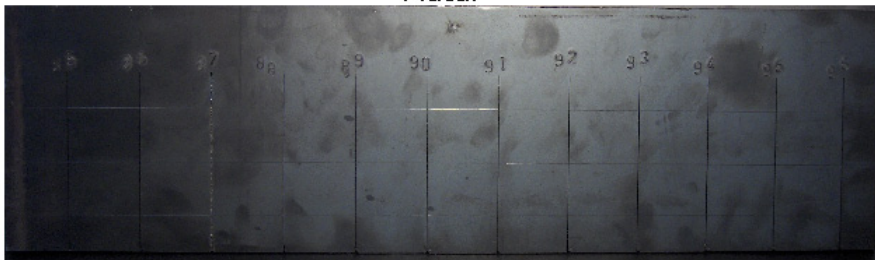


Placa6

Figura nr. A 3.3. - Plăcile 5 și 6



Placa 7

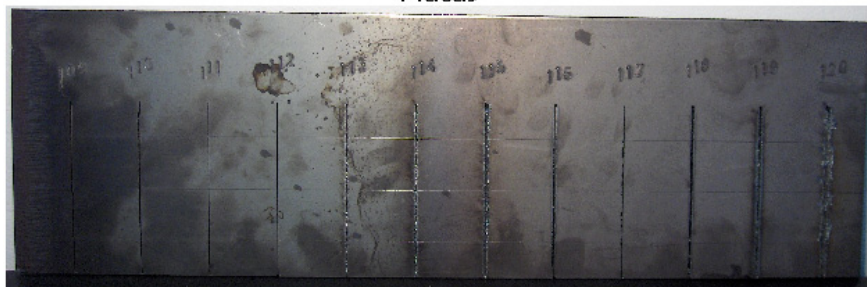


Placa 8

*Figura nr. A 3.4. – Plăcile 7 și 8*



Placa 9



Placa 10

*Figura nr. A 3.5. – Plăcile 9 și 10*



## REFERINȚE

- 1.[Aldulhadi, 1998] - Elrahim Aldulhadi, Jean-Mare Pelletier, Michel Lambertin, *Development in laser cutting of steel: analytical modelling and experimental validation of metallurgical effects*, ICALEO 1998.
- 2.[Almeida, 2006] - I.A. Almeida, W. de Rossi , M.S.F. Lima, J.R. Berretta, G.E.C. Nogueira, N.U. Wetter, N.D. Vieira Jr. *Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd: YAG laser parameters* Journal of Materials Processing Technology, 179 (2006) 105–110
- 3.[Anderson, 2006] - Mark Anderson, Rahul Patwa, Yung C. Shin *Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis* International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) p:1879–1891
- 4.[Arai, 2004] - Takeji Arai and Noritaka Asano *Mechanism of dross formation in laser cutting* Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2004.
- 5.[Bagger, 2001] - C Bagger, F.O. Olsen *Pulsed mode laser cutting of sheets for tailored blanks* Journal of materia processing tehnology 115 , (2001) p:131-135.
- 6.[Boboescu, 2008] - Remus Boboescu, Valentin Glod "*Characteristics of irradiation parameters for industrial lasers used in welding*" Proceedings of the 14<sup>th</sup> Internațional Conference Land Forces Academy „ Nicolae Bălcescu" november 2008 Sibiu p:158-164, ISSN 1843-6722.
- 7.[Boboescu, 2009 a] - Remus Boboescu and Valentin Glod "*Forms problems with heat for heating material laser*" Proceedings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy Sibiu 2009 Vol.6p:45-49 ISSN 1843-6722.
- 8.[Boboescu, 2009 b] - Remus Boboescu and Valentin Glod "*Heating Problems related forms of phase transformation produced by laser materials Irradiation*" Proceedings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization Nicolae Bălcescu Land Forces Academy Sibiu 2009 Vol.6 p: 50-54 ISSN 1843 - 6722
- 9.[Caydas, 2008] - Ulas Caydas, Ahmet Hascalik *Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics* (Technical Note) Optics & Laser Technology 40 (2008) p:987–994
- 10.[Chaussier, 2003] - J.F.Chaussier, A.B. Vannes , *La decoupe par procedes „haut energies", 2003*
- 11.[Chen, 1997 ] - Shang-Liang Chen, W. O'Neill *The effects of power rippling on CO<sub>2</sub> laser cutting*, Optics lasers tehnology, Vol. 29. No. 3. p: 125-134, 1997
- 12.[Chen, 1998] - Shang-Liang Chen *The effects of gaz composition on the CO<sub>2</sub> laser cutting of mild steel* Journal of Materials Processing Technology 73 (1998) p:147–159.
- 13.[Chen, 1999 a] - Kai Chen and Y. Laurence Yao *Striation Formation and Melt Removal in Laser Cutting Process* , Journal of Manufacturing Processes nr1 vol1 p:44-53 1999.
- 14.[Chen, 1999 b] - Shang-Liang Chen *The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting*, Journal of Materials Processing Technology 88 (1999) p:57–66.

- 15.[Chen, 2001] - Kai Chen and Y. Laurence Yao and Vijay Modi *Gas Dynamic effects on Laser Cut Quality* Journal of Manufacturing Processes nr.3 vol.3 p:38-49 2001
- 16.[Chryssolouris, 1990] - G. Chryssolouris, *Laser Machining-Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, september 1990.
17. [Charschan, 1993] - Sidney S. Charschan, (Editor) *Guide to Laser Materials Processing*, Laser Institute of America 1993
- 18.[Cicala, 1996] - E. Cicală, „*Tăiere conturată cu fascicul laser*”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din Timișoara, 1996
- 19.[Cicala, 1999] - Eugen Cicală „*Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*”, Timișoara, 1999.
- 20.[Cicala, 2005] - Eugen Cicală „*Metoda experimentelor factoriale*”, Timișoara 2005
- 21.[Di Pietro, 1994] - P. DiPietro și Y. L. Yao “*An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality-a review*”, Marea Britanie, 1994.
- 22.[Di Pietro, 1995] - P. Di Pietro and Y. L. Yao “*A new technique to characterize and predict laser cut striation*”, Int.J. Mach. Tools Manufact Vol 35 No 7 p: 993-1002, 1995.
- 23.[Di Pietro, 2000] - P. Di Pietro, Y. L. Yao, A. Jeromin “*Quality optimisation for laser machining under transient conditions*”, Journal of Materials Processing Technology 97 (2000) p:158-167.
- 24.[Drăgănescu, 1986] - V. Drăgănescu, V. G. Velculescu „*Prelucrări termice cu laseri*”, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1986
- 25.[Dubey, 2008] - Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava “*Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis*”, Optics and Lasers in Engineering 46 (2008) p:124-132
26. [Edler, 1991] - R. Edler, P. Berger, New Nozzle “*Concept for Cutting with High Power Lasers*”, ICALEO (1991), p:253
- 27.[Firet, 1987] - J. Firet, M. J. Terry, B. A. Ward, *Overview of flow dynamics in gas-assisted laser cutting*, SPIE Vol.801 High Power Lasers (1987) p:243-249.
- 28.[Fukaya, 1991] - Fukaya, Kuniaki and Karube, Norio, 1991, “*Analysis of CO<sub>2</sub> laser beam suitable for thick metal cutting*,” LIA (Laser Institute of America) v 71 Nov 4-9 1990 1991 p: 61-70
- 29.[Gabzdyl, 2000] - J. T. W. Penn P. Cahill J. Koch “*Cutting 50mm shipbuilding parts with less than 2kW of CO<sub>2</sub> laser power*”, ICALEO 2004
- 30.[Geiger, 1996] - Geiger, M., Schuberth, S. and Hutfless, J., 1996, “*CO<sub>2</sub> laser beam sawing of thick sheet metal with adaptive optics*,” *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde* 37 1 Jan-Feb 1996, p: 5-11.
- 31.[Ghany, 2005] - K. Abdel Ghany, M. Newishy “*Cutting of 1,2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser*”, Journal of Materials Processing Technology 168 (2005) p:438-447
- 32.[Glod, 2005] - Valentin Glod „*Modificări structurale și de conținut în materialele metalice prelucrate cu laser*”, Universitatea Națională de Apărare „Carol I” București, 2005 p: 10-20, ISBN 173-663-165-6
- 33.[Glod, 2006] - Valentin Glod „*Tipuri de laser utilizați astăzi la tăiere materialelor metalice*” *Universitatea Națională de Apărare „Carol I” București*, 2006 p: 35-42 ISBN 173-663-333-0
- 34.[Glod, 2006 a] - Valentin Glod “*The present level of industrial oportunities cutting of the metallic materials with laser beam*”, *Academia Forțelor Terestre „Nicolae Bălcescu”/ Land Forces Academy Publishing House, Sibiu*, 2006 p: 21-32, ISBN 173-7809-51-3



- 35.[Glod, 2006 b] - Valentin Glod "The formulation of thermic problems due to the laser irradiation with applications use in laser cutting", Academia Forțelor Terestre „Nicolae Bălcescu”/ Land Forces Academy Publishing House, Sibiu,p: 37, 2007, ISSN 1843-6722.
- 36.[Glod, 2007 a] - Valentin Glod "The termic fields effects and intern intensity induces in the object processed in cutting with laser beam" Academia Tehnică Militară, București, 2007 p: 37-47 ISBN 978-973-640-127-5.
- 37.[Glod, 2007 b] - Valentin Glod "Study of thermic effects which appear in laser beam cutting process" Academia Navală „Mircea cel Bătrân" Constanța, 2007 ISBN 978-973-8303-84-3
- 38.[Glod, 2008] - Valentin Glod, Remus Boboescu, "Experimental investigation in laser cutting of steels" Proceedings of the 14<sup>th</sup> Internațional Conference Land Forces Academy „Nicolae Bălcescu" november 2008 Sibiu p:165-172, ISSN 1843-6722
- 39.[Glod, 2009 a] - Valentin Glod, Remus Boboescu, Ion Sporea "Effect of process parameters on quality laser made cutting" Proceeedings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization „Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy Sibiu 2009 Vol.6 p: 271-276, ISSN 1843 - 6722.
- 40.[Glod, 2009 b] - Valentin Glod "Structural channges of the material for laser cuts made" Proceesings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization „Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy Sibiu 2009 Vol.6 p: 277-280 ISSN 1843 - 6722
- 41.[Glod, 2009 c] - Valentin Glod, Remus Boboescu "Experimental study on the oxygen flow in oxygen assisted laser cutting" Proceedings of the 21st International Conference NAV-MAR-EDU 2009 Editura Academiei Navale „Mircea cel Bătrân" Constanța p: 411-416, ISSN 1843-6749
- 42.[Glod, 2010 a] - Valentin Glod "**Effects of Oxygen pressure in Laser Cutting**", **Metalurgia Internațional nr. 1/ 2011, p: 18-25, ISSN 1582-2214 – reviste acreditate de CNCISIS la categoria „A" cotate ISI.**
- 43.[Golnabi, 2009] - H. Golnabi, M. Bahar "Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting" Optics & Laser Technology 41 (2009) p:454-460
- 44.[Graaf, 2000] - R. F. de Graaf, J. Meijer "Laser cutting of metal laminates: analysis and experimental validation", Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) p:23-28
- 45.[Gross, 2006] - Markus S Gross *On gas dynamic effects in the modelling of laser cutting processes* Applied Mathematical Modelling 30 (2006) p:307-318.
- 46.[Guo, 2009] - Shaogang Guo, HuJun, Luo Lei, ZhenqiangYao "Numerical analysis of supersonic gas-dynamic characteristic in laser cutting", Optics and Lasers in Engineering 47 (2009) p:103-110.
- 47.[Harris, 2006] - J. Harris and M. Brandt "The Cutting of Thick Steel Plate using a Spinning Nd:YAG Laser Beam", ICALEO Proceedings 2006
- 48.[Heidenreich, 1996] - Heidenreich, B., Jueptner, W. and Sepold, G.,1996, "Fundamental investigations of the burn-out phenomenon of laser cut edges" Lasers in Engineering, Vol.5 No.1, 1996, p: 1-10.
- 49.[Ion, 2005] - John C. Ion *Laser Processing of Engineering Materials Principles, Procedure and Industrial Application* Elsevier 2005 Ltd. ISBN: 978-0-7506-6079-2.
- 50.[Ispas, 1998] - V. Ispas – *Materiale și tehnologii primare. Metale și Aliaje (Metalurgia și studiul metalelor)*, Ed. Universal Castfil, Ploiești 1998
- 51.[Ilavarasan, 1995] - Ilavarasan, P. M., Molian, P. A., "Laser cutting of thick sectioned steels using gas flow impingement on the erosion front" Journal of Laser Applications v7 n4 Dec 1995, p: 199-209

- 52.[Jebbari, 2008] - Neila Jebbari, Mohamed Mondher Jebbari, Faycal Saadallah, Annie Tarrats-Saugnac, Raouf Bennaceur, Jean Paul Longuemard *Thermal affected zone obtained in machining steel XC42 by high-power continuous CO<sub>2</sub> laser* Optics & Laser Technology 40 (2008) p:864-873
- 51.[Kaebernick 1999] - H. Kaebernick, Bicleanul, M. Brandt *Theoretical and Experimental Investigation of Pulsed Laser Cutting* Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999
- 52.[Kaebernick, 1998] - H. Kaebernick, A. Jeromin, P. Mathew *Adaptive Control for Laser Cutting Using Striation Frequency Analysis* Annals of the CIRP Vol. 47/1/1998
- 53.[Karatas, 2006] - Cihan Karatas, Omer Keles, Ibrahim Uslan, Yusuf Usta *Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation* Journal of Materials Processing Technology 172 (2006) 22-29
- 54.[Karazi, 2009] - S.M. Karazi, A.Issa, D.Brabazon *Comparison of ANN and DoE for the prediction of laser-machined micro-channel dimensions* Optics and Lasers in Engineering 2009
- 55.[Kovalev, 2009] - O.B. Kovalev, P.V. Yudin, A.V. Zaitsev *Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal* Applied Mathematical Modelling 33 (2009) p:3730-3745
- 56.[King, 1986] - „The Cutting of Thick Steel Plate using a Spinning N:YAG”
- 57.[Kanaoka, 1991] - Kanaoka, Masaru, 1991, "Quality of cutting edge of thick steel plate cut by CO<sub>2</sub> laser," Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/ Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C v 57 n 539 Jul 1991, p: 2441-2446
- 58.[Kovalev, 2005] - O. B. Kovalev and A. V. Zaitsev *Modeling of the free-surface shape in laser cutting of metals. 2. Model of multiple reflection and absorption of radiation* Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 46, No. 1, p: 9-13, 2005
- 59.[La Rocca, 1998] - Aldo V. La Rocca, Luciano Borsati, Maichi Cantello, *Nozzle design to control fluid-dynamics effects in laser cutting* , SPIE Vol.2207 p.354
- 60.[Lamikiz, 2005] - A. Lamikiz, L. N. Lopez de Lacalle, J. A. Sanchez D. del Pozo J.M. Etayo J.M. Lopez *CO<sub>2</sub> laser cutting of advanced high strength steels (AHSS)* Applied Surface Science 242 (2005) 362-368
- 61.[Lei, 2009] - Hong Lei, Zhang Yi , Mi Chenglong *Technological study of laser cutting silicon steel controlled by rotating gas flow* Optics & Laser Technology 41 (2009) p:328- 333.
- 62.[Leong, 2002] - K. H. Leong, G. Kornecki, P. G. Sanders, and J. S. Keske *Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy*.
- 63.[Li, 2001] - Yonggang Li, William P. Latham, Aravinda Kar *Lumped parameter model for multimode laser cutting* Optics and Lasers in Engineering 35 (2001) p:371-386
- 64.[Li, 2007] - Lin Li , M. Sobih, P. L. Crouse *Striation-free Laser Cutting of Mild Steel Sheets* Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007p:193-196.
- 65.[Mai, 2002] - Ching-Chuan Mai, Jehnming Lin *Flow structures around an inclined substrate subjected to a supersonic impinging jet in laser cutting* Optics & Laser Technology 34 (2002) 479 - 486
- 66.[Malikov, 2009] - A.G.Malikov, A.M.Orishich and V.B.Shulyatyev, *Scaling laws for the laser-oxygen cutting of thick-sheet mild steel*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, doi:10.1016/j.ijmactools.2009.06.013
- 67.[Man, 1997] - H.C.Man, J Duan, T M Yue *Design and Characteristic Analysis of Supersonic Nozzles for High Gas Pressure Laser Cutting* Journal of material processing Technology 63 (1997) 217-222

- 68.[Man, 1998] - H. C. Man, J. Duan, T. M. Yue *Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting* Optics & Laser Technology 30 (1998) 497-509
- 69.[Mas, 2003] - Cédric MAS *Modélisation physique du procédé de découpe de métaux par laser* Teză doctorat Universitatea PARIS 6 2003
- 70.[Mas, 2006] - Cédric Mas, Rémy Fabbro *Steady-State Laser Cutting Model* ICALEO Proceedings 2006
- 71.[Molian, 1993] - Molian, P. A., 1993, "Dual-beam CO<sub>2</sub> laser cutting of thick metallic materials," Journal of Materials Science, Vol. 28 No.7, Apr 1 1993, p: 1738-1748.
- 72.[Nagels, 2007] - E. Nagels, J. R. Duflou, J. Van Humbeeck *The influence of sulphur content on the quality of laser cutting of steel* Journal of Materials Processing Technology 194 (2007) 159-162
- 73.[Nanu, 2003] - A. Nanu și colectivul, „Tehnologii neconvenționale la început de mileniu”, vol. I, ed. Augusta, Timișoara, 2003
- 74.[Nichici, 1996] - A. Nichici, E. Cicală R. Mee *Prelucrarea datelor experimentale*, curs Timișoara 1996
- 75.[Nichici, 2004] - Alexandru Nichici/ Academia Română, Filiala Timișoara, *Energii concentrate – suport al prelucrării termice a materialelor*, Editura Politehnica, Timișoara, 2004
- 76.[O’Neill, 2000] - W. O’Neill, J. T. Gabzdy *New developments in laser-assisted oxygen cutting* Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) 355-367
- 77.[Olsen, 1989] - Fleming O. Olsen, *Cutting Front Formation in Laser Cutting*, Annals of the CIRP Vol. 38/1/1989 p. 215.
- 78.[Ostle, 1975] - Bernard Ostle, Richard W. Mensing, *Statistics in Research*, Third Edition, The Iowa State University Press 1975
- 79.[Pearsică, 2006] - Marian Pearsică, Ștefan Nedelcu, Doru Luculescu „Metode de modelare a procesului de prelucrare cu laser”, Editura Albastră Cluj –Napoca 2006
- 80.[Poprawel, 1998] - R. Poprawel *Modeling, Monitoring and Control in High Quality Laser Cutting* Journal of Materials Processing Technology 74 (1998) 234-242
- 81.[Prasad, 1998] - G. V. S. Prasad, E. Siores, W. C. K. Wong *Laser cutting of metallic coated sheet steels* Journal of Materials Processing Technology 74 (1998) p:234-242
- 82.[Prohorov, 1980] - Prohorov – *Laser Heating of Metals*, 1980
- 83.[Prusa, 1999] - Joseph M. Prusa, Girish Venkitachalam, Palaniappa A. Molian *Estimation of heat conduction losses in laser cutting* International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) p:431-458
- 84.[Rajaram, 2003] - N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S.H. Cheraghi *CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel* International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) p:351-358
- 85.[Rao, 2009] - Raghavendra Rao, Vinod Yadava *Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement* Optics & Laser Technology 41 (2009) p:922-930
- 86.[Roco, 1998] - Aldo V. Roco, Luciano Bornati, Maichi Contelo – *Nozle design to control fluid dynamics effects in laser cutting*, ICALEO, 1998
- 87.[Rykalin, 1978] - N. Rykalin, A Ugllov and A. Kokora *Laser machining and welding* Mir Publishers Moscow 1978

- 88.[Salem, 2008] - Hanadi G. Salem, Mohy S. Mansour, Yehya Badr, Wafaa A. Abbas *CW Nd:YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O<sub>2</sub> assist gas* Journal of materials processing technology 196 (2008) p:64–72
- 89.[Schuöcker, 2001] - D. Schuöcker *Mathematical modeling of laser-assisted deep drawing* Journal of Materials Processing Technology 115 (2001) p:104–107
- 90.[Schuöcker,1985] - D. Schuöcker W. Abel, *Material removal mechanism of laser*, University of Technology, Vienna, Austria.
- 91.[Shanjin, 2006] - L. Shanjin, W. Yang *An investigation of puls laser cutting of titanium alloy sheet* Optics and Lasers in Engineering 44 1068 (2006) p: 1067–1077.
- 92.[Shony, 1997] - Shony *Developments in laser-assisted oxygen cutting* Optics and Lasers in Engineering 1997
93. [Sharma, 2010]- Amit Sharma, VinodYadava, Raghavendra Rao *Optimization of kerf quality characteristics during Nd:YAG lasercutting of nickel based superalloy sheet for straight and curved cut profiles* Journal of Materials Processing Technology 2010.
- 94[Sheridan,2003] Dan Sheridan BOC *On the Cutting Edge with LASOX —Laser Assisted Oxygen Cutting* CryoGas International — March 2003 p:25-26
- 95[Shuja, 2000]S.Z. Shuja, B.S. Yilbas *3-Dimensional conjugate laser heating of a moving slab* Applied Surface Science 167 2000.p:134–148
- 96.[Tani, 2003] - Giovani Tani, Luca Tomesani, Giampaolo Campana *Prediction of melt geometry in laser cutting* Applied Surface Science 208-209 (2003) 142-147
- 97.[Thawari, 2005] - G. Thawari, J.K. Sarin Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi *Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys* Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 229–239
- 98.[Wang, 1999] - J. Wang, W.C.K. Wong *CO<sub>2</sub> laser cutting of metallic coated sheet steels* Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) p:164-168.
- 99.[Yilbas, 1998] - B. S. Yilbas, A.Kar, *Thermal and efficiency analysis of the CO<sub>2</sub> laser cutting process*, Optics and Lasers in Engineering 30 (1998) p:93-106.
- 100.[Yilbas, 1995] - B. S. Yilbas, A. Z. Sahin, *Oxygen assisted laser cutting mechanism a laminar boundary layer approach including the combustion process*, Optics & Lasers Technology Vol. No.3 1995
- 101.[Yilbaş, 1996] - B. S. Yilbas *Experimental investigation into CO<sub>2</sub> laser cutting parameters* Journal of Material Processing Technology 58 (1996) p:323-330
- 102.[Zheng, 1996] - H. Y. Zheng, Z. Z. Han, Z.D. Chen, Wchen, S. Yan – *Quality and Cost Comparises between Laser and Waterjet Cutting*, Jurnal of Matemals Procening Technology 62 (1996) p:294-298