

# **INVESTIGAREA PROCESELOR DE TĂIERE LASER Nd:YAG A MATERIALELOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la

Universitatea „Politehnica” din Timișoara  
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ  
de către

**ing. Ramona Cristina Laslău**

Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Alexandru Nichici
Referenți științifici:	prof.univ.dr. ing. Laurentiu Slătineanu prof.univ.dr. ing. Dan-Maniu Dușe prof.univ.dr. ing. Traian Fleșer

Ziua susținerii tezei: 14 septembrie 2012

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 |   |

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, 2006

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

Tăierea cu fascicul laser este unul din procesele industriale cu largă răspândire actuală pe plan mondial și cu o extindere tot mai mare în țară. În procesele de tăiere 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.

Teza de doctorat „Investigarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică” abordează două direcții de cercetare: una orientată asupra procesului de tăiere cu fascicul laser și condițiilor 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.

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

Pe această cale doresc să mulțumesc domnului profesor univ. dr. ing. Alexandru Nichici, pentru sprijinul acordat pe parcursul întregii perioade de desfășurare a lucrării, și totodată pentru înțelegerea și susținerea în toată această perioadă.

De asemenea, doresc să mulțumesc pentru ajutorul acordat în realizarea părții experimentale, domnului conferențiar univ. dr. ing. Eugen Cicală, domnului dr. fiz. Remus Boboescu, și nu în ultimul rând distinsei mele colege, d-șoara ș.l.dr.ing Adelina Han, fără de care nu ar fi fost posibilă finalizarea acestei lucrări.

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 de asemenea soțului meu Adrian 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.

Timișoara, septembrie 2012

Ramona LASLĂU  
(căsătorită CHIRCULESCU)

**Dedic această lucrare**

**soțului meu Adrian și fiicei noastre Ariana,**

**la împlinirea minunatei vârste de 5 ani**

Laslău, Ramona-Cristina

**INVESTIGAREA PROCESELOR DE TĂIERE LASER Nd:YAG A  
MATERIALELOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 45, Editura Politehnica,  
2012, 204 pagini, 131 figuri, 118 tabele.

ISSN:1842-8967

ISBN:978-606-554-511-3

Cuvinte cheie: tăiere laser Nd:YAG, materiale compozite

Rezumat: Cercetarea doctorală a avut ca obiective principale modelarea matematică a legăturilor de cauzalitate care guvernează procesele de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică și evidențierea, cu ajutorul acestora, a celor mai favorabile regimuri de tăiere din punct de vedere tehnologic și energetic. În acest fel, rezultatele cercetării pot fi nemijlocit utilizate pentru proiectarea rațională a proceselor industriale de tăiere laser.

Pentru atingerea acestor obiective, a fost proiectat și realizat un program experimental complex, original și eficient. Acesta integrează experimente clasice și factoriale, la nivel de fază pilot și fază principală. Procesarea datelor experimentale, pe baza unei structuri logice personalizate, s-a făcut cu un program Statgraphics. Cercetarea doctorală include și o tentativă de modelare analitică aproximativă, a unora dintre procesele termice specifice tăierii laser.

# CUPRINS

<b>Lista cu notații, abrevieri și acronime .....</b>	<b>8</b>
<b>Introducere .....</b>	<b>10</b>
<b>Capitolul 1 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică.....</b>	<b>14</b>
1.1 Interacțiunea radiație laser – substanță .....	14
1.2 Procedee de prelucrare cu fascicul laser .....	22
1.3 Tăierea cu laser a materialelor compozite .....	34
1.4 Obiectivele tezei de doctorat .....	44
1.5 Concluzii parțiale .....	45
<b>Capitolul 2 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală .....</b>	<b>47</b>
2.1. Strategii ale cercetării experimentale.....	47
2.2 Condiții fizice ale experimentării .....	51
2.2.1. Materialul supus tăierii laser .....	51
2.2.2. Echipamentul laser .....	54
2.2.3. Controlul condițiilor de iradiere la tăierea laser .....	58
2.3 Programe de experimentare.....	62
2.3.1 Experimentul E1F.....	62
2.3.1.1. Proiectarea experimentului și realizarea măsurătorilor ...	62
2.3.2 Experimentul E2.....	67
2.4 Metode și mijloace de măsurare a dimensiunilor tăieturilor	75
2.5 Concluzii parțiale.....	78
<b>Capitolul 3 Fezabilitatea și stabilitatea proceselor de tăiere termică cu laser .....</b>	<b>80</b>
3.1 Efecte termice ale iradierii cu fascicul laser a materialelor.....	80
3.2 Condiții pentru penetrarea laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică .....	85
3.2.1. Condiții generale .....	85
3.2.2. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară obținerii temperaturii de ardere a matricii polimerice .....	86
3.2.3. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară fracturării termo-mecanice a fibrei de sticlă .....	87
3.2.4. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară obținerii temperaturii de înmuiere și respectiv de topire a fibrei de sticlă .....	88
3.2.5. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară pentru realizarea topirii fibrei de sticlă .....	88
3.2.6. Câteva aspecte fenomenologice ale penetrării laser a materialelor CEFS .....	89

## 6 Cuprins

3.3 Estimarea experimentală a condițiilor de fezabilitate a tăierii laser ...	91
3.4 Concluzii parțiale .....	94
<b>Capitolul 4 Rezultatele cercetării experimentale (aspecte cantitative) .....</b>	<b>96</b>
4.1 Strategia procesării datelor experimentale.....	96
4.2. Procesarea și interpretarea rezultatelor experimentale .....	103
4.2.1 Valorile funcțiilor obiectiv determinate experimental.....	103
4.2.2 Experimente factoriale .....	106
4.2.2.1. Funcții obiectiv primare: Lățimea tăieturii .....	106
4.2.2.1.1. Lățimea tăieturii la partea superioară Bs .....	107
4.2.2.1.2. Lățimea tăieturii la partea inferioară Bi .....	109
4.2.2.1.3. Lățimea medie a tăieturii Bm .....	112
4.2.2.2. Funcții obiectiv compuse: Debitul prelucrării .....	115
4.2.2.3. Funcții obiectiv integratoare: Energia specifică de tăiere.	118
4.2.3. Experimente clasice .....	121
4.2.3.1. Experimente cu penetrarea completă a materialului supus tăierii .....	121
4.2.3.1.1. Funcții obiectiv primare: Lățimea tăieturii .....	121
4.2.3.1.2. Funcții obiectiv compuse: Debitul prelucrării .....	127
4.2.3.1.3. Funcții obiectiv integratoare: Energia specifică de tăiere .....	132
4.2.3.2. Experimente cu penetrarea incompletă a materialului supus tăierii .....	136
4.2.3.3. Analiza situațiilor în care procesul de tăiere nu a fost realizat .....	138
4.3. Concluzii parțiale .....	143
<b>Capitolul 5 Rezultatele cercetării experimentale (aspecte calitative).....</b>	<b>145</b>
5.1 Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser .....	145
5.1.1. Introducere.....	145
5.1.2. Calitatea muchiilor longitudinale ale tăieturilor .....	146
5.1.2.1. Experimentul E1.....	146
5.1.2.2. Experimentul E2.....	146
5.1.3. Topografia suprafețelor efective ale tăieturilor.....	153
5.1.4. Afectarea termică a materialului.....	158
5.2. Cateva aspecte ale capabilității a procesului tehnologic de tăiere laser.....	159
5.3. Concluzii parțiale.....	163
<b>Capitolul 6 Concluzii finale și contribuții personale.....</b>	<b>164</b>
6.1 Concluzii finale.....	164
6.1.1. Particularități ale tăierii laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice epoxidică și armătură fibră de sticlă.....	164

---

6.1.2. Dezvoltarea procesului de tăiere laser, in conditii de iradiere laser Nd:YAG cu insuflarea unui jet de gaz coaxial cu FL.....	166
6.1.3 Reactia materialului la iradierea laser specifică proceselor de tăiere.....	166
6.1.4 Controlabilitatea și stabilitatea proceselor de tăiere laser.....	167
6.1.5 Identificarea și modelarea matematică empirică a proceselor de tăiere laser.....	168
6.1.5.1 Cadrul general.....	168
6.1.5.2 Programul experimental complex PILOT și PRINCIPAL, clasic și factorial.....	169
6.1.5.3 Elemente caracteristice ale calității proceselor de tăiere și tăieturilor realizate cu laser.....	170
6.1.5.4 Informații punctuale, cu valabilitate locală, furnizate de programul experimental complex pentru funcțiile obiectiv relevante ale cercetării doctorale.....	171
6.2 Contribuții personale.....	172
<b>Anexa 1 Valori măsurate ale lățimii tăieturii, date primare ale măsurătorilor.....</b>	<b>174</b>
<b>Anexa 2 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru experimentul E2.....</b>	<b>181</b>
<b>Anexa 3 Tabele pentru analiza statistică a variațiilor ANOVA.....</b>	<b>187</b>
<b>Anexa 4 Poziția relativă a pereților tăieturii.....</b>	<b>191</b>
<b>Referințe.....</b>	<b>199</b>

## Lista notațiilor și abrevierilor folosite

a	Difuzivitatea termică [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
A	Coeficientul de absorbție [-]
B <sub>i</sub>	Lățimea tăieturii la partea inferioară [mm]
b <sub>ij</sub>	Coeficienții modelului matematic polinomial
B <sub>m</sub>	Lățimea medie a tăieturii
B <sub>s</sub>	Lățimea tăieturii la partea superioară [mm]
c	Căldura specifică [ $\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$ ]
D	Diametrul fasciculului laser [mm]
e	Grosimea materialului [mm]
E	Energia [J]
E <sub>l</sub>	Energia liniară [J/mm]
E <sub>p</sub>	Energia pe puls [J]
E <sub>sp</sub>	Energia specifică [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]
f	Frecvența de pulsare [Hz]
I	Intensitatea fasciculului laser în pata focală [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
k	Conductivitatea termică [ $\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ ]
L	Căldura latentă [J/kg]
M <sup>2</sup>	Factorul de calitate al fasciculului laser [-]
P	Puterea medie a fasciculului laser [W]
P <sub>p</sub>	Puterea pe puls [W]
q	Densitatea de flux termic [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]
Q <sub>p</sub>	Debitul prelucrării [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]
r	Raport care arată numărul de pulsuri consecutive care iradiază un punct de pe suprafața piesei [-]
r <sub>p</sub>	Raportul de paralelism pentru secțiunea transversală prin tăietură [-]
S	Strălucirea [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
spo	Raportul de acoperire a spoturilor consecutive „spot overlap” [-]
T	Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]
t	Timpul [s]
T	Coeficientul de transmisie
t <sub>c</sub>	Perioada de pulsare [ms]
t <sub>ic</sub>	Timpul de interacțiune relativ la deplasarea fasciculului laser [ms]
t <sub>off</sub>	Timpul de închidere a iradierii [ms]
t <sub>p</sub>	Durata pulsului [ms]



$u$	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]
$w_0$	Talia fasciculului laser [m]
$x_i$	Factori de influență
$y$	Funcția obiectiv
$z$	Coordonata de penetrare în profunzimea materialului [m]
$z$	Distanța de propagare a căldurii în material
$Z_f$	Distanța pe care poate fi menținut diametrul minim al fasciculului laser relativ la direcția de propagare [m]

**Greek**

$\eta$	Ciclul (raportul dintre timpul pulsului și perioadă) [%]
$\delta$	Defocalizarea (distanța dintre planul focal și suprafața piesei) [m]
$\sigma$	Tensiunea indusă în material de un gradient termic [N/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Lungimea de undă a radiației laser [m]
$\theta$	Unghiul de divergență [rad]
$\theta_d$	Unghiul de divergență dat de teoria difracției [rad]
$\rho$	Densitatea vaporilor [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	Unghiul de înclinare a fețelor tăieturii [rad]

**Notații**

F- Ratio	Raportul pentru testul statistic Fisher
P-val	Abateră de la medie
DF	Numărul gradelor de libertate
$R^2$	Coeficientul de corelație
$R^2$ (adj. for d. f.)	Coeficientul de corelație corectat pentru diferență
ICALEO	Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics
ZIT	Zona influențată termic
OP	Obiectul de prelucrat
FL	Fasciculul laser
FI	Factori de influență
FO	Funcții obiectiv

## INTRODUCERE

În perioada actuală, laserul reprezintă componenta esențială a unor sisteme tehnologice specifice, de largă răspândire, deopotrivă performante și eficiente, într-un spectru larg de aplicații industriale din domeniul nano-, micro- și macro-tehnologiilor de ultimă generație.

Sistemele tehnologice laser cunosc o evoluție dinamică continuă, atât pe planul soluțiilor constructiv-tehnologice și informatice promovate, cât și pe planul dezvoltării de noi aplicații, tot mai exigente din punct de vedere tehnic, economic și ecologic.

În particular, în ultima perioadă, sistemele laser Nd:YAG au cunoscut o evoluție excepțională, determinată de creșterea puterii surselor laser, de posibilitatea transmiterii prin fibră optică a energiei radiației în zona de lucru și de controlul precis al activării energetice a materialului supus prelucrării printr-un regim de iradiere pulsant. Aplicațiile acestor sisteme în sfera macro-tehnologiilor sunt concentrate cu preponderență pe operații de sudare, tăiere și marcarea materialelor metalice. În prezent, asistăm la creșterea semnificativă a interesului pentru valorificarea potențialului excepțional al sistemelor laser Nd:YAG la prelucrarea materialelor nemetalice și, în mod deosebit, a materialelor compozite.

În contextul descris, teza de doctorat **„Investigarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică”** reprezintă o abordare științifică și tehnologică originală a unor probleme importante și actuale, care condiționează funcționalitatea și eficiența proceselor de tăiere cu laser Nd:YAG a unor materiale compozite cu matrice polimerică (rășină epoxidică) și armătură ceramică (fibră de sticlă). Dificultățile unei asemenea abordări sunt legate:

- în primul rând, de structura eterogenă a materialului compozit și de reacția diferită a componentelor acestuia la iradierea și încălzirea susținută de laser;
- în al doilea rând, de slaba cuplare inițială a radiației laser Nd:YAG (lungime de undă 1,06  $\mu\text{m}$ ) cu materialele de natură polimerică și ceramică din constituția compozitului;
- în al treilea rând, de caracterul instabil și de cunoașterea insuficientă, teoretică și mai ales practică, a proceselor de transfer de energie și masă dezvoltate în condițiile date și a efectelor tehnologice induse de acestea.

Obiectivele principale ale cercetării doctorale au fost modelarea matematică a legităților de cauzalitate care guvernează procesele de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică și respectiv evidențierea, cu ajutorul acestor modele, a celor mai favorabile regimuri de tăiere din punct de vedere tehnologic și energetic. În acest fel, rezultatele cercetării pot fi nemijlocit utilizate în

proiectarea rațională a proceselor de tăiere laser investigate, aplicate la scară industrială.

Pentru atingerea acestor obiective, a fost proiectat și realizat un program experimental complex, deosebit de eficient, cu caracter original. Acest program integrează, ca elemente interactive, experimente clasice și factoriale, realizate la nivel de fază pilot și fază principală. Prelucrarea datelor experimentale achiziționate, în vederea determinării modelelor matematice empirice ale funcțiilor obiectiv semnificative pentru procesele de tăiere laser s-a făcut cu softul Statgraphics.

Dincolo de aspectele cantitative ale efectelor induse de radiație în materialul prelucrat, sintetizate în geometria tăieturilor realizate, au fost analizate și aspecte calitative, de natură fizico-chimică, ale interacțiunii radiație-substanță în condițiile particulare descrise.

În fine, cercetarea doctorală a inclus și o tentativă de modelare analitică, primară și aproximativă, a unora dintre procesele termice specifice tăierii laser, pe baza cărora pot fi estimate orientativ condițiile de iradiere capabile să asigure penetrarea materialului și formarea unui front de eroziune stabil.

Teza de doctorat **„Investigarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică”** are o extensie de 204 pagini și este structurată pe 6 CAPITOLE, precedate de o INTRODUCERE și urmate de 4 ANEXE și de lista de REFERINȚE BIBLIOGRAFICE.

Capitolul 1, intitulat **„Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică”** (32 pagini), reprezintă o sinteză bibliografică selectivă referitoare la fenomenele de interacțiune laser-substanță, la dezvoltarea procedeelelor de tăiere și la particularitățile unor aplicații de interes industrial ale tăierii laser a materialelor investigate în teză. Sinteza servește, înainte de orice, evidențierii problemelor deschise, a căror rezolvare va face obiectul și va defini, în finalul capitolului, obiectivele cercetării doctorale. Sinteza bibliografică este utilă și pentru înțelegerea și aprofundarea creativă a conținutului original al cercetării doctorale.

În capitolul 2, **„Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală”** (32 pagini), este definită logica și strategia viitoarei cercetări doctorale și, pe această bază, sunt proiectate programe de experimentare specifice – clasice și factoriale, cu faze pilot și principală – parte integrantă a unui program complex, deosebit de eficient prin prisma raportului dintre informația furnizată și costurile de desfășurare. O atenție deosebită este acordată caracterizării avansate a materialului supus prelucrării și, respectiv, sistemelor tehnologice laser Nd:YAG utilizate. Sunt prezentate metodele și mijloacele de măsurare a elementelor geometrice ale tăieturilor realizate, principal purtător de informație asupra eficienței tăierii laser. În fine, în matricile-program ale diferitelor experimentări sunt prezentate și rezultatele brute, neprelucrate statistic, ale mulțimii încercărilor efectuate, ca bază de referință pentru cititorii avizați ai tezei de doctorat. Experimentarea propriu-zisă a fost realizată la ISIM Timișoara (faza Pilot) și la IUT Creusot, Franța (faza Principală). Și acest capitol, la fel ca și celelalte capitole de conținut, se încheie cu un număr de concluzii parțiale, care explicitează și susțin firul conducător al derulării cercetării doctorale.

Capitolul 3, **„Fezabilitatea și stabilitatea proceselor de tăiere termică cu laser”** (15 pagini) integrează, printr-o viziune personală, abordări și considerații pragmatice simplificate cunoscute ale proceselor de transfer de căldură și masă, în condițiile date și le valorifică ca bază de pornire pentru determinarea fezabilității și stabilității tăierii laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică. Deși limitat ca extensie, acest capitol relevă componenta inginerescă, pragmatică a cercetării doctorale, definind baza fenomenologică a proiectării acțiunii tehnologice de tăiere laser.

Capitolul 4, **„Rezultatele cercetării experimentale (aspecte cantitative)”** (48 pagini), are cea mai mare extensie în cadrul tezei și concentrează principalele rezultate originale ale cercetării doctorale. Se definesc funcțiile obiectiv, ca expresii ale legăturilor de cauzalitate și corelație dintre factorii de influență și efectele de interes tehnologic, specifice proceselor de tăiere laser investigate, după cum urmează:

- în cazul penetrării complete a materialului: lățimea tăieturilor la partea superioară și inferioară a plăcilor, lățimea medie a tăieturilor, debitul prelucrării și energia specifică de tăiere;
- în cazul penetrării incomplete a materialului: profunzimea tăieturii;

Principalii factori de influență controlabili, luați în considerare în condițiile date, au fost puterea laser și viteza de tăiere, precum și un derivat important al acestora, raportat la obiectivele tezei, energia liniară de tăiere.

În continuare, sunt prezentate și analizate, în concordanță cu planurile de experimentare definite în capitolul 2, modelele matematice empirice ale funcțiilor obiectiv specifice mulțimii experimentărilor efectuate. În final, se încearcă o generalizare a rezultatelor particulare obținute, urmărindu-se, corespunzător obiectivelor cercetării doctorale, evidențierea celor mai favorabile condiții pentru creșterea debitului prelucrării și reducerea consumurilor specifice de energie.

În capitolul 5, **„Rezultatele cercetării experimentale (aspecte calitative)”** (18 pagini), completare firească a capitolelor 3 și 4, sunt examinate și caracterizate câteva aspecte ale influenței stabilității procesului de tăiere laser și fenomenologiei specifice de prelevare a materialului compozit investigat la iradierea cu laser, asupra calității tăieturilor rezultate. Problemele analizate interesează, în aceeași măsură, atât pe furnizorii de componente constructive tăiate cu laser, cât și pe utilizatorii acestora. Domeniul abordat, la nivel de pionierat, în capitolul 5 lasă, prin complexitate și importanță, cel mai mare spațiu pentru cercetări științifice viitoare.

În fine, capitolul 6, **„Concluzii finale și contribuții personale”**, (9 pagini), sintetizează elementele definitorii ale cercetării doctorale și scoate în evidență contribuțiile personale ale doctorandului în problematica abordată.

Cele patru **„Anexe”** alăturate tezei de doctorat, furnizează date numerice importante pentru validarea modelelor matematice empirice dezvoltate, dar care depășesc sfera de interes a publicului profesional de factură tehnologică.

Teza de doctorat se încheie cu lista de „**Referințe bibliografice**” efectiv valorificate în teză, care include 103 titluri, dintre care 40 titluri (40% din total) publicate în ultimii 5 ani.

Se poate aprecia că prin concepție, metodologie și rezultate obținute, prezentate anterior, cercetarea doctorală și teza de doctorat „**Investigarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică**” și-au îndeplinit integral obiectivele asumate.

Conținutul prezentei teze de doctorat se adresează, cu prioritate, fizicienilor și inginerilor implicați în studiul, proiectarea, exploatarea și optimizarea proceselor tehnologice de tăiere cu laser a materialelor compozite. În aceeași măsură, datele și informațiile furnizate pot fi utile pentru conceperea și lansarea de noi aplicații industriale ale sistemelor tehnologice laser.

# 1. STADIUL ACTUAL AL TĂIERII CU LASER A MATERIALELOR COMPOZITE CU MATRICE POLIMERICĂ

## 1.1 Interacțiunea radiație laser - substanță

Principalele proprietăți fizice ale radiației laser sunt:

**Monocromaticitatea.** Frecvența emisă de laser este dată de diferența de energie între nivelele energetice între care are loc emisia radiației. Aceasta este dată de relația lui Planck:

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1.1)$$

h - constanta lui Planck

E<sub>2</sub>- energia nivelului superior

E<sub>1</sub> - energia nivelului inferior

Cele două nivele energetice între care are loc emisia radiației laser sunt stabile. Astfel o singură frecvență este emisă și amplificată în cavitatea optică. În acest fel radiația laser are o singură lungime de undă, ceea ce înseamnă că radiația emisă de laser este monocromatică. Laserul Nd:YAG emite radiație cu lungimea de undă de 1.06 μm.

**Coerența.** Coerența radiației electromagnetice înseamnă menținerea constantă a diferenței de fază între două puncte ale frontului de undă. Coerența este de două tipuri: spațială și temporală. Coerența spațială este limitată la o anumită suprafață, iar coerența temporală este limitată la un anumit interval de timp. Radiația laser prezintă coerență spațială și temporală ridicată în comparație cu sursele clasice de lumină.

**Divergența și direcționalitatea.** Divergența este dată de unghiul de divergență ( $2\theta_0$ ), care dă o măsură a creșterii diametrului fascicului laser în direcția de propagare și este dependentă de construcția rezonatorului și lungimea de undă a radiației [Cicală, 1997], [Nichici, 1983]:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad [\text{rad}] \quad (1.2.)$$

$\lambda$  = lungimea de undă a radiației laser [m]

$w_0$  = talia fascicului laser [m]

Divergența fasciculului laser este extrem de mică ( $2 \div 20 \text{ mrad}$ ) [Nichici, 1983].

**Strălucirea.** Strălucirea este o proprietate importantă a fasciculului laser pentru procesarea materialelor și se poate determina cu relația:

$$S = P_L \cdot (\lambda \cdot M^2)^{-2} [\text{W/m}^2 \cdot \text{sterad}] \quad (1.3)$$

în care  $P_L$  - puterea fasciculului laser,  
 $M^2$  - factor de calitate al fasciculului laser

Strălucirea, în cazul unui fascicul laser ideal și în absența pierderilor de putere de-a lungul traiectoriei de propagare, este maximă și constantă. Conceptul de strălucire stă la baza comparării între surse diferite de laser, dar trebuie menționat faptul că interschimbabilitatea totală se realizează numai în condițiile în care sistemul optic de focalizare este astfel calculat încât să determine aceeași geometrie a zonei focale. [Cicală, 1997]

**Calitatea fasciculului laser.** Calitatea este un concept care își face tot mai mult loc pentru caracterizarea fasciculelor laser din punctul de vedere al performanțelor tehnologice și al reproductibilității, deoarece procesarea materialelor se face cu fascicule laser reale. [Cicală, 1997]

Calitatea tot mai bună a fasciculului laser de interes tehnologic este favorabilă localizării interacțiunii fascicul laser-obiect de prelucrat pe suprafețe de arie tot mai mică, și realizarea de intensități superioare ale radiației laser. [Nichici, 2004]

A fost introdusă anterior mărimea  $M^2$  care se numește factor de calitate al fasciculului laser și are, convențional, valoarea  $M^2 = 1$  pentru un fascicul laser ideal ( $\text{TEM}_{00}$ ). Această mărime este dată de relația:

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot w_{0R} \cdot \theta_{0R} [-] \quad (1.4)$$

$w_{0R}$  - talia fasciculului real;

$\theta_{0R}$  - unghiul de divergență pentru fasciculul real.

Cu ajutorul factorului de calitate, diametrul unui fascicul laser real poate fi calculat în orice punct de-a lungul direcției sale de propagare. Legătura dintre diametrul și divergența fasciculului laser real și a fasciculului laser ideal este:

$$2w_R(z) = M^2 \cdot 2w(z) [\text{m}] \quad (1.5)$$

unde:  $2w(z)$  – diametrul fasciculului laser ideal;

$$2\theta_R(z) = M^2 \cdot 2\theta(z) [\text{rad}] \quad (1.6)$$

unde:  $2\theta(z)$  – divergența fasciculului laser ideal [Rofin-Sinar, 1998];

În lumina celor prezentate mai sus se poate spune că un fascicul laser de calitate superioară prezintă următoarele avantaje din punct de vedere practic:

## 16 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

- diametrul focarului laser de dimensiune redusă;
- adâncimea mare a focarului laser;
- unghi de divergență scăzut.

Realizarea performanțelor și repetabilitatea lor în procesarea materialelor depinde în mare măsură de stabilitatea în timp a fasciculelor laser. Instabilitatea unor factori de interes practic (puterea de ieșire, diametrul fasciculului laser, poziția centrului fasciculului, poziția maximului intensității și valoarea acestuia, etc.) crește odată cu creșterea puterii și depinde de construcția sursei laser.

Pentru minimizarea instabilității sau, mai exact, pentru o mai bună stabilitate a fasciculului laser, este necesar să se acționeze asupra a două categorii de factori:

- **factori intrinseci** sursei care sunt mai puțin accesibili utilizatorului (presiunea și mișcarea mediului activ, descărcarea electrică de pompaj, forma plasmă, etc.);
- **factori extrinseci** sursei asupra cărora utilizatorul poate, de regulă, să acționeze (gradul de curățenie al componentelor optice, gradul de filtrare al mediului înconjurător, vibrațiile mecanice, etc)[Cicală, 1997].

**Focalizarea radiației.** Din punctul de vedere al procesării materialelor este importantă divergența rezultată în zona focală. Adâncimea convențională a zonei focale se consideră a fi distanța de-a lungul direcției de propagare a fasciculului laser pentru care diametrul focarului se modifică cel mult cu 5% [Cicală, 1997]. Astfel, adâncimea focarului unui fascicul laser gaussian este dată de relația:

$$Z_f = \frac{8\lambda \cdot f^2}{\pi \cdot D^2} \text{ [m]} \quad (1.7)$$

Diametrul focarului laser este limitat inferior în principal de două fenomene: difracția și aberația de sfericitate [Cicală, 1997].

Pentru un fascicul laser gaussian (TEM<sub>00</sub>), cu lungimea de undă  $\lambda$  și diametrul D incident pe o lentilă cu distanța focală f (Fig.1.1), din condiția de difracție, diametrul focarului este:

$$2w_0 = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D} \text{ [m]} \quad (1.8)$$

D – diametrul fasciculului laser nefocalizat [m];

$2w_0$  – diametrul petei în planul focal (talia fascicolului laser)[m];

$Z_f$  – adâncimea menținerii focalizării [m];

f – distanța focală a lentilei [m];

$2\theta_0$  – unghiul de divergență a fasciculului laser [rad].



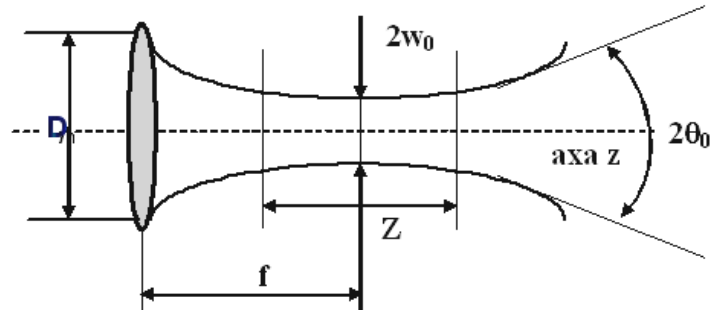


Fig 1.1 Mărimile caracteristice fascicului laser [Cicală,1997]

Diametrul focarului limitat de aberația de sfericitate se poate determina cu relația:

$$2w_0 = k_s \cdot \frac{D^3}{f^2} \text{ [m]} \quad (1.9)$$

unde  $k_s$  este un coeficient ce depinde de indicele de refracție al lentilei, de forma acesteia și de poziția ei.

Modificarea distanței focale determină o modificare a diametrului focarului laser și de asemenea, o modificare a adâncimii focarului  $Z_f$ , ceea ce duce la variația intensității și penetrabilității fascicului laser.

**Polarizarea radiației.** Radiația electromagnetică poate fi ușor polarizată. Spre exemplu, laserii Nd:YAG generează o radiație electromagnetică polarizată liniar. Pentru procesarea materialelor se utilizează radiații electromagnetice nepolarizate sau polarizate circular deoarece radiația electromagnetică polarizată liniar este dependentă de direcția de procesare. Câmpul electric care oscilează perpendicular pe direcția de propagare definește fasciculul laser nepolarizat.

Fasciculul laser polarizat liniar este definit prin oscilația câmpului electric al radiației electromagnetice într-un singur plan, iar fasciculul laser polarizat circular este definit prin oscilarea câmpului electric astfel încât vectorul câmp formează o spirală în jurul direcției de propagare (Fig.1.2) [Bitzel, 1998]. Polarizarea fascicului laser este un factor care influențează rezultatele procesului de tăiere laser. Mecanismul de absorbție a radiației este de tip electric. Astfel, energia transmisă către material depinde de orientarea vectorului câmp electric. S-a arătat în [Cryssoluris, 1991] că radiația liniar polarizată produce tăieturi puțin adânci. Pentru a evita acest neajuns, radiația liniar polarizată este transformată în radiație circular polarizată.

În urma focalizării fascicului laser rezultă o zonă de arie minimă (spot laser) și implicit de intensitate maximă a fascicului laser numită pată focală. Mărimile necesare pentru caracterizarea fascicului laser sunt: monocromaticitate, coerența, divergența, diametrul, calitatea, stabilitatea și strălucirea [Cicală, 1997].

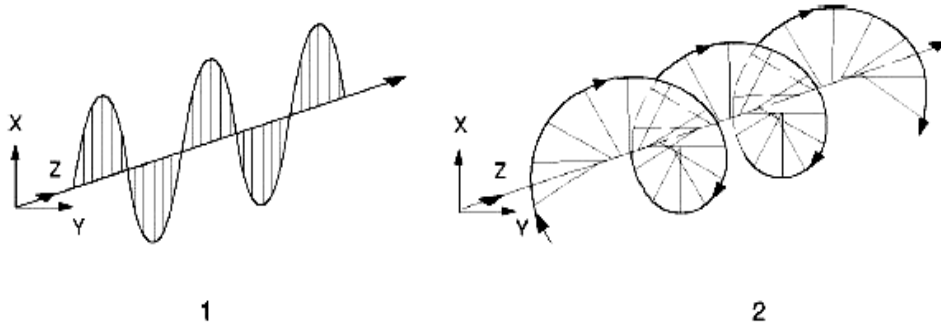


Fig. 1.2 Moduri de polarizare a fascicului laser:  
(1)- polarizare liniară; (2) – polarizare circulară [Bitzel, 1998]

**Sisteme tehnologice laser.** Sistemul de prelucrare care folosește fasciculul laser ca sursă termică de energie este numit pe scurt *SISTEM LASER* și are următoarele componente :

- sursa laser (oscilatorul laser);
- sistemul de transmitere și focalizare a radiației ;
- sistemul cinematic de mișcare relativă a piesei;
- sistemul de suflare a gazului de lucru la suprafața piesei.

Sursa laser este caracterizată de proprietățile fascicului laser emis. Cele mai importante caracteristici ale radiației emise de laser sunt:

- regimul de iradiere (în undă continuă CW sau pulsată PW);
- puterea medie;
- modul electromagnetic transversal care va da distribuția spațială a intensității laserului.

Un laser cu mediu solid Nd:YAG conține: mediul laser, sistemul de pompaj optic, sistemul de răcire și cavitatea optică (Fig. 1.3). Laserul folosit pentru încercările experimentale are ca și mediul activ un cristal, care are compoziția chimică  $Y_3Al_5O_{12}$  (granat de ytriu și aluminiu). Acesta este dopat cu ioni de neodim. Cristalul YAG al laserului poate fi transparent și colorat. Când este dopat cu aproximativ 1% Nd, acesta are o culoare albastră [Chryssoulouris, 1991].

Sursa laser realizează prin emisie stimulată fasciculul laser. Acesta este transmis către piesa prin fibră optică în cazul laserilor cu Nd:YAG și cu ajutorul oglinzilor în cazul laserilor cu  $CO_2$ .

Capul laser conține lentila de focalizare la suprafața piesei și sistemul de suflare al gazului protector. Transmiterea radiației de la ieșirea din laser prin fibra optică către capul laser influențează caracteristicile fascicului laser.

Sistemul cinematic asigură mișcarea relativă dintre capul laser și piesă. Aceasta se realizează prin mișcarea capului laser relativ la piesă sau invers, prin mișcarea piesei. Se deosebesc sistemele cinematice care permit mișcarea în plan în coordonate  $x,y$  și cele care permit mișcarea spațială.

Aceste sisteme pot avea până la 5 axe de rotație, acestea permițând efectuarea de prelucrări care necesită traiectorii complicate. Mișcarea spațială de tipul  $x,y,z$  este suficientă pentru a regla viteza de tăiere și poziția planului focal, relativ la suprafața piesei, în condițiile unei traiectorii liniare a iradierii la suprafața piesei. Reglajul traiectoriei se realizează folosind comanda numerică. [Charschan, 1993] [Dausinger, 2001]

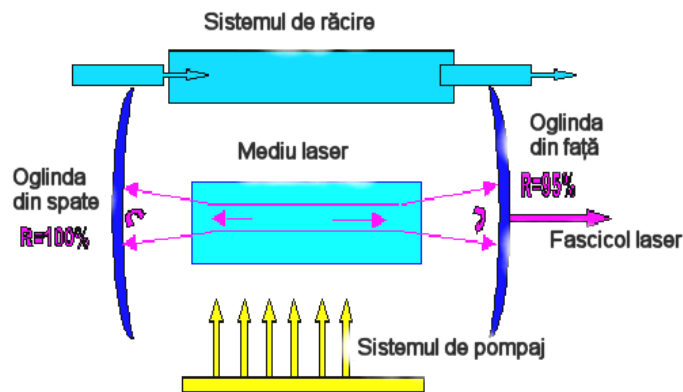


Fig. 1.3 Schema de principiu a unei surse laser cu mediu solid, în care  $R$  este coeficientul de reflexie

**Interacțiuni radiație laser - substanță.** Interacțiunea dintre radiație și substanță produce modificări în ambele medii. Radiația este absorbită total sau parțial. O parte din intensitatea fascicului laser incident este absorbită în material și produce două tipuri de efecte: termice și atermice. Prin efect termic se înțelege încălzirea materialului și transformări de fază din material. Efectele atermice constau în ruperea legăturilor chimice. Restul radiației se regăsește sub formă de radiație transmisă sau reflectată specular sau difuz. Interacțiunea dintre un fascicul laser intens și substanță are următoarele particularități:

- efectele termice induse în material sunt de amploare datorită intensității ridicate;
- există o interacțiune multiplă a fascicului laser cu materialul solid, cu topitura, vaporii și plasma, în zona de interacțiune apar simultan mai multe faze datorate efectelor termice care participă la interacțiune.

Interacțiunea radiației cu materialul prezintă două situații distincte. La iradierea mediilor transparente și semitransparente absorbția are loc în profunzimea materialului, intensitatea radiației transmise în material scade exponențial după legea Beer-Lambert, astfel se dezvoltă o sursă termică volumică în material. La iradierea materialelor opace absorbția are loc în stratul de la suprafață. Se formează o sursă termică la suprafața materialului. În fig. 1.4 se prezintă variația coeficientului de absorbție pentru metale și pentru materiale organice, se observă că materialele organice au un coeficient de absorbție redus pentru radiația emisă de laserul cu Nd:YAG.

20 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

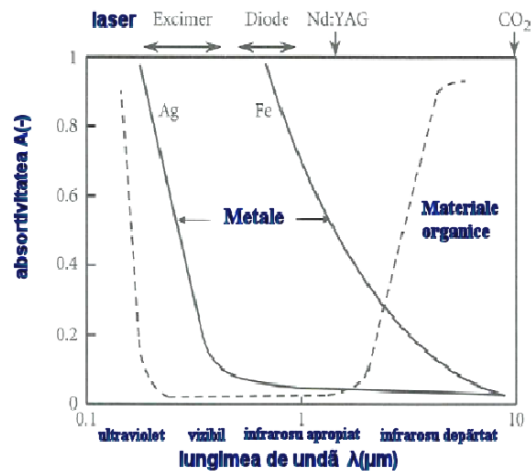


Fig. 1.4 Variația absorbtivității în funcție de lungimea de undă pentru metale și materiale organice [Ion 2005 ]

Curbe pentru transmisia radiației pentru diverse tipuri de sticlă sunt prezentate în fig. 1.5. Coeficientul de transmisie este relativ ridicat pentru radiația laser emisă de laserul cu Nd:YAG. Aceasta înseamnă o valoare scăzută pentru coeficientul de absorbție. Pentru iradierea sticlei, fasciculul laser cu CO<sub>2</sub> produce o sursă termică la suprafață datorită coeficientului de absorbție ridicat, în timp ce pentru fasciculul laser Nd:YAG are loc o transmitere a radiației laser în profunzimea materialului, și astfel apare o sursă termică volumică, fig. 1.6.

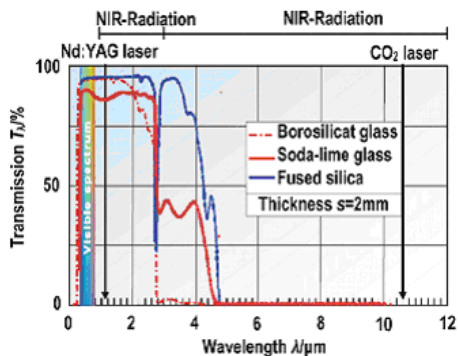


Fig. 1.5. Curbele de transmisie pentru diferite tipuri de sticlă [Yang 2010]

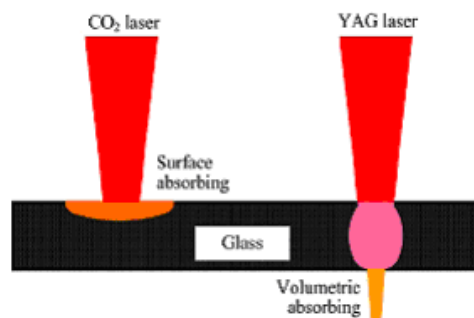


Fig. 1.6. Schemă pentru absorția radiației laser de către sticlă [Yang 2010]

În figurile de mai sus se poate observa că, pentru radiația cu lungimea de undă de 1.06 μm emisă de laserul cu Nd:YAG, coeficientul de absorbție este scăzut. Intensitatea ridicată a fasciculului laser va compensa coeficientul de absorbție scăzut. Intensitatea absorbită în material va avea valori suficient de ridicate pentru a produce efecte termice importante. Coeficientul de absorbție crește pentru sticla topită.

Prelucrarea cu laser Nd:YAG a materialelor polimerice și a sticlei este posibilă dacă se asigură valori ridicate pentru intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei. Astfel, folosind o intensitate a fasciculului laser de  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> și având un coeficient de absorbție de 0.01 înseamnă producerea în material a unei surse termice care are o intensitatea de  $10^5$  W/cm<sup>2</sup> și care este suficientă pentru a produce efecte termice importante în material.

La iradierea cu fascicul laser a unui material compozit de tip **CEFS** (material **compozit** constituit dintr-o matrice polimerică (rășină **epoxidică**) și o armătură (**fibră de sticlă**) legate coerent) poate apărea topirea sticlei.

Apariția fazei topite la iradierea cu fascicul laser este specifică metalelor. În acest caz prima transformare de stare de agregare, care apare la iradierea materialului este topirea. Temperatura de topire se atinge la suprafața materialului în urma unui proces de încălzire progresivă în material.

Topirea materialului în profunzimea sa necesită o viteză suficient de mare de propagare a frontului de topire. Pentru a îndepărta materialul în stare topită din tăietură, este necesară o creștere a temperaturii topiturii peste temperatura de topire. În această situație scade vâscozitatea topiturii și aceasta poate fi îndepărtată cu ușurință din topitură, iar la marginile tăieturii există un strat topit resolidificat.

Condițiile de iradiere specifice proceselor de prelucrare laser trebuie să aibă în vedere:

- tipurile de laser folosite, care pot fi clasificate după mediul activ (gaz, lichid sau solid), putere, energie și mod de operare;
- natura materialelor prelucrate: metale și aliajele acestora, ceramică și sticlă, polimeri și nu în ultimul rând, materiale compozite, cum este cazul acestei lucrări;

După modul de interacțiune dintre radiație și material, se remarcă două tipuri de interacțiuni:

**A. Interacțiunea de tip termic**, constă în transferul de caldură. Procesarea termică a materialelor se referă la fenomenele fizice de încălzire, topire și vaporizare.

**B. Interacțiunea de tip atermic**, se referă la schimbări la scară atomică, produse în material. Procesarea atermică se referă la realizarea sau ruperea legăturilor chimice de coeziune interatomică.

Factorii care caracterizează iradierea pot fi concentrați pe două mărimi:

- intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei
- durata de interacțiune dintre radiație și material.

Încadrarea procedurilor de prelucrare laser în funcție de acești factori este prezentată în Tabelul 1.1. Pentru un proces de prelucrare termică cu fascicul laser este importantă stabilirea nivelelor optime de reglare atât pentru intensitatea fasciculului laser, cât și pentru durata de interacțiune dintre radiația laser și material.

## 22 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

Tabel 1.1 Intensități ale fascicolului laser și durate de interacțiune pentru procesele tehnologice [Ion, 2005], [Charschan, 1993].

Nr. crt.	Procesul tehnologic	Intensitatea fascicolului laser pe suprafața piesei [W/cm <sup>2</sup> ]	Durata 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, îndepărtare de material prin vaporizare	$10^6-10^7$	$10^{-6}-10^{-4}$
8	prelucrări de suprafață	$10^7$	$10^{-7}-10^{-6}$
10	detonare în plasmă	$10^7-10^8$	$10^{-3}-10^{-2}$
11	unda de șoc	$10^8$	$10^{-7}-10^{-6}$

Efectele calitative ale fenomenelor care au loc la prelucrarea cu fascicul laser în sensul de producere a încălzirii, topirii și vaporizării materialului, respectiv descompunerii chimice a acestuia, sunt date de intensitatea fascicolului laser.

Efectele cantitative ale fenomenelor termice care au loc în material sunt determinate de durata de interacțiune între radiația laser și material. Variația independentă a intensității fascicolului laser și a duratei de interacțiune dintre radiația laser și material este valabil numai între anumite limite.

Tăierea materialului compozit CEFS, prezentată în lucrare, folosește un nivel al intensității fascicolului laser în material de  $10^7$  [W/cm<sup>2</sup>], specific îndepărtării de material în stare de vapori. Durata de interacțiune utilizat de  $10^{-3}$  s este specific realizării topirii materialului. Astfel, apare și fenomenul de topire a sticlei. Prin durata de interacțiune relativ mare poate fi controlată extinderea efectelor termice în profunzimea materialului.

### 1.2 Procedee de prelucrare cu fascicul laser

Iradieră cu fascicul laser produce în material o sursă de căldură. Aceasta este utilizată pentru prelucrări termice ale materialelor. Între aceste aplicații, tăierea laser ocupă primul loc ca răspândire în industrie. În fig. 1.7 se prezintă locul tăierii laser între procesele de prelucrare a materialelor. Principalele aplicații ale tăierii laser sunt pentru metale și în special pentru oțeluri.

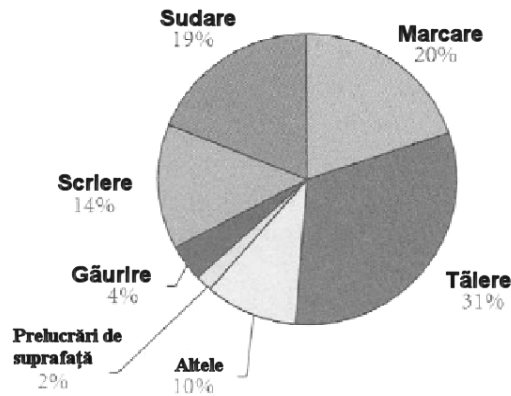


Fig. 1.7 Utilizarea laserilor industriali în procesele de prelucrare, în jurul anului 2000 [Ion, 2005]

Tăierea laser este aplicabilă tuturor tipurilor de materiale, mai mult aplicațiile de tăiere folosesc atât mecanismul termic, cât și mecanismul atermic de prelucrare a materialelor. Tăierea laser se realizează prin îndepărtarea materialului, sau prin fracturarea lui controlată. Tăierea laser se încadrează între procesele de prelucrare laser în care are loc îndepărtarea materialului prelevat din zona de prelucrare.

Pentru tăierea laser se amintesc următoarele **avantaje**:

- lipsa contactului mecanic dintre sistemul tehnologic și material, care elimină uzura specifică a elementelor active ale sistemului tehnologic în timpul procesului de prelucrare;
- posibilitatea de a tăia materiale dure și fragile reducând fisurile din material;
- reducerea pierderilor de material prin realizarea de tăieturi înguste;
- flexibilitatea procesului, prin posibilitatea de a prelucra materiale diferite și de a realiza contururi diferite sau accesul în spații greu accesibile, folosind același sistem tehnologic laser.

Realizarea tăierii laser se face folosind sisteme tehnologice care prezintă un grad ridicat de automatizare. Se pot decupa în bune condiții contururi curbe sau se pot realiza diferite prelucrări spațiale. Procesul de tăiere laser prezintă un grad ridicat de reproductibilitate.

Alături de avantajele anterior menționate pentru tăierea laser, se remarcă și un număr de elemente care constituie **dezavantaje** pentru aplicarea procesului :

- consumul energetic ridicat datorită transformării energiei electrice în radiație laser și alimentării sistemelor auxiliare funcționării sistemului tehnologic laser;
- producerea de vapori și fumuri toxice pentru personalul operator;
- existența unor riscuri de iradiere a personalului operator sau de aprindere a unor materiale aflate în zona învecinată spațiului de prelucrare;

## 24 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

- un control riguros al parametrilor de proces, pentru ca prelucrarea să se realizeze în bune condiții;
- limitarea grosimilor materialului de prelucrat, precum și riscul obținerii unor zone influențate termic importante.
- la limită, erori de reglare a regimului de iradiere laser sau abateri excesive ale traiectoriei de tăiere în raport cu traiectoria normală pot duce la compromiterea procesului de tăiere.

În cadrul procedeelor de tăiere investigate, recurgerea 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. După principalul efect termic produs de fasciculul laser asupra materialului, se disting două variante principale ale proceselor de tăiere cu laser:

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

Tăierea laser a materialelor polimerice, ceramice și compozite cu matrice polimerică, se încadrează în tăierea laser prin descompunerea materialului. Prin descompunerea materialului se înțelege o transformare ireversibilă a structurii acestuia. Se înțelege, de asemenea, că revenirea materialului la starea solidă după răcire nu este posibilă.

În fig. 1.8 se prezintă elementele desfășurării procesului de tăiere. Astfel, capul laser, avansează în raport cu piesa.

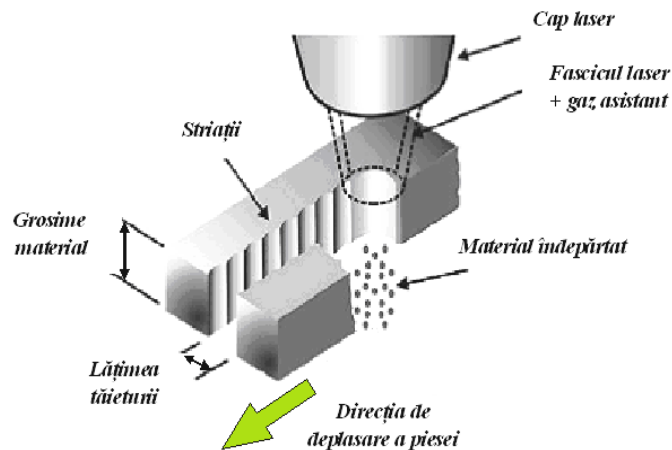


Fig. 1.8 Schema de principiu pentru realizarea tăierii materialului

În zona iradiată de fasciculul laser are loc descompunerea materialului. Se obține frontul de tăiere (sau frontul de eroziune) care se deplasează cu fasciculul laser în material. Materialul descompus este îndepărtat datorită gazului asistent care este suflat către piesă, coaxial cu fasciculul laser. Gazul asistent are rolul de a îndepărta materialul descompus și de a proteja lentila de focalizare a fasciculului



laser. În unele cazuri există un efect reactiv, datorită interacțiunii dintre gazul asistent și piesă. Acest fenomen reprezintă un aspect particular al tăierii cu laser asistat de oxigen.

Pe suprafața tăieturii realizate se obțin striaiții sau alte tipuri de neregularități datorită oscilațiilor care se produc la frontul de tăiere.

Pentru tăierea laser a unui material compozit cu matrice de rășini epoxidice, schema tăieturii este prezentată în fig. 1.9. Se identifică pe tăietura realizată o zonă arsă, o zonă afectată termic în interiorul materialului și o zonă afectată termic la suprafața materialului. Pentru zona arsă de la suprafața materialului s-a asociat o temperatură de 550 °C, iar pentru limita zonei afectate termic, în material s-a determinat o temperatură de 150 °C, suprafața materialului a fost afectată până la temperatura de 20 °C.

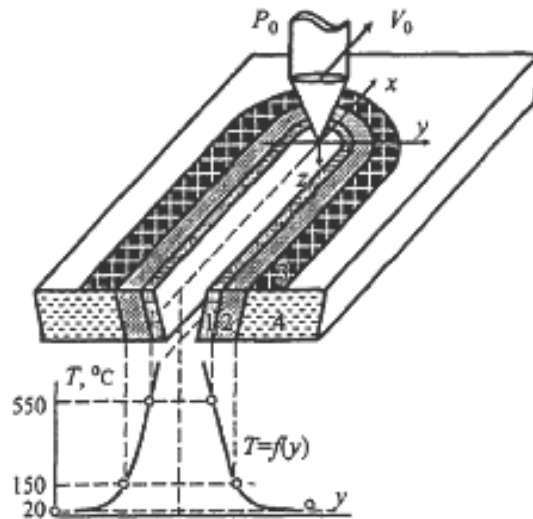


Fig. 1.9 Distribuția temperaturii la marginile tăieturii și diferitele zone care se obțin în materialul compozit; 1 - zona arsă, 2 - zona afectată termic în profunzimea materialului, 3 - zona afectată termic la suprafața materialului; 4 - materialul de bază fibre de aramide în plastic [Nasedkin, 1999]

Fig. 1.10 arată că, pentru procesul de tăiere a materialului compozit, îndepărtarea de material se produce odată cu creșterea temperaturii și de asemenea, crește viteza de îndepărtare a materialului. Fig 1.11 arată că distribuția temperaturii la marginea tăieturii este de tip Gaussian și are loc o creștere a temperaturii cu puterea fasciculului laser.

Pentru a estima efectul factorilor de influență controlabili în desfășurarea procesului de tăiere se recomandă o abordare secvențială evolutivă a procesului de tăiere laser. Astfel, procesul de tăiere laser prezintă trei etape importante:

- penetrarea materialului;
- stabilizarea frontului de tăiere;
- propagarea frontului de tăiere în material;

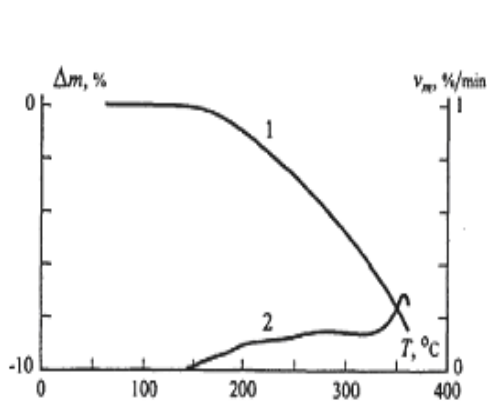


Fig. 1.10 Pierderea de masă  $\Delta m$  și viteza de îndepărtarea materialului în procesul de tăiere  $v_m$  ca funcții de temperatură [Nasedkin 1999]

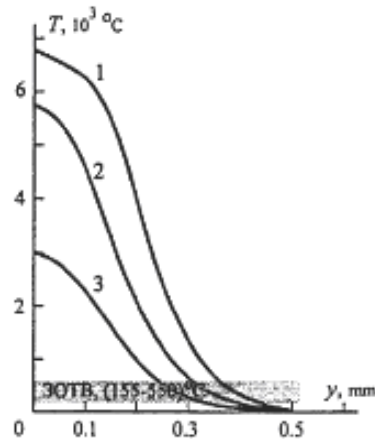


Fig 1.11 Distribuția temperaturii la marginea tăieturii pentru o placă de 2mm, la diferite puteri 1-1100W, 2-900 W, 3-600 W [Nasedkin 1999]

Fenomenele anterior amintite reprezintă atât etape în realizarea procesului de tăiere, cât și condiții necesare pentru realizarea unui proces de tăiere laser în regim staționar. Fenomenele termice produse la iradierea cu fascicul laser au ca obiect prima și a treia etapă a procesului de tăiere. Rolul jetului de gaz asistent este limitat la a doua etapă.

**Un exemplu de procedeu de tăiere cu fascicul laser** este tăierea laser de evaporare. Aceasta reprezintă situația în care la iradierea cu fascicul laser, materialul iradiat este adus în stare de vapori. Acest lucru se realizează prin încălzire urmată de topire, apoi de vaporizare, fără să existe cantități însemnate de topitură. Trecerea în stare de vapori se poate realiza, de asemenea, prin sublimarea materialului. În ambele cazuri trecerea în stare de vapori a materialului solid necesită un nivel ridicat al intensității fasciculului laser.

Îndepărtarea produselor evaporării sau descompunerii materialului iradiat se poate realiza liber sau prin acțiunea gazului de lucru. La tăierea laser de evaporare tăietura se obține prin separarea a două zone de material aflate în stări diferite: structural neafectat și, respectiv, material evaporat. Materialul învecinat tăieturii realizate nu este structural afectat, dar poate fi afectat termic.

Tăierea laser de evaporare se realizează pentru un număr redus de materiale, în condiții de iradiere adecvate. Ea este totuși importantă ca bază de pornire pentru modelarea matematică a proceselor de tăiere laser, realizabilă prin aplicarea directă a ecuației căldurii.

Reprezentarea schematică a tăierii laser de evaporare poate fi generalizată pentru toate procedeele tăierii laser cu descompunerea materialului iradiat, specifică majorității materialelor polimerice, ceramice și compozitelor pe baza acestora. Descompunerea materialului poate fi tratată ca o transformare de fază obținută datorită acumulării căldurii în material și descrisă similar cu vaporizarea. Aceasta

înseamnă că poate fi definită o temperatură la care descompunerea materialului are loc, și o căldură latentă necesară pentru ca descompunerea materialului să se producă. Se consideră că vaporizarea/descompunerea materialului este singura transformare de fază care are loc. Până la atingerea temperaturii de transformare de fază este aplicabilă ecuația căldurii.

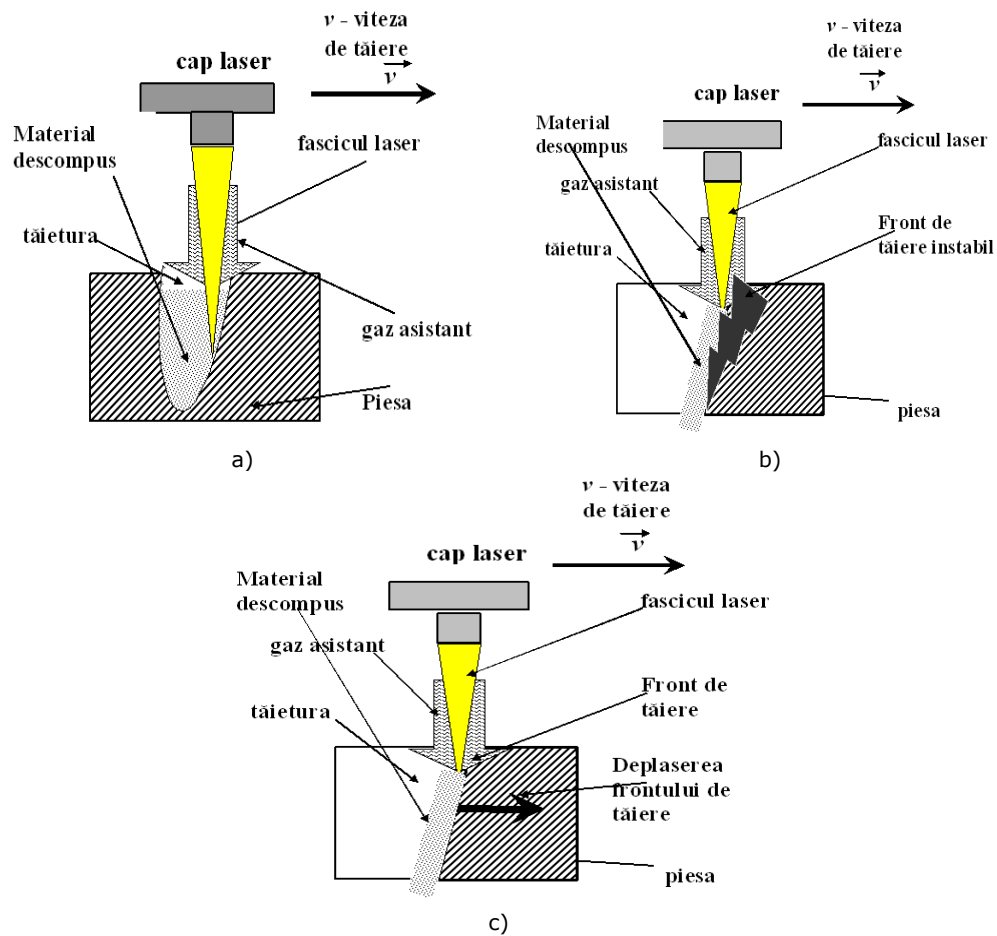


Fig 1.12 Etape ale procesului de tăiere laser a) Penetrarea materialului, b) Stabilizarea frontului de tăiere, c) Propagarea frontului de tăiere în material

Modelarea matematică pentru tăierea laser de evaporare a fost prezentată în mai multe lucrări [Kim, 1996] [Kim, 2000], [Kim, 2001]. Se consideră trei zone distincte în materialul iradiat, (fig. 1.13) pentru care se aplică ecuația de conducție a căldurii. Astfel, zona I se află înaintea fasciculului laser, în această zonă are loc încălzirea materialului. În zona II are loc evaporarea materialului și eroziunea acestuia. În zona III acțiunea fasciculului laser a dispărut și are loc răcirea materialului. Pentru fiecare din aceste zone se consideră o formă particulară a ecuației căldurii.

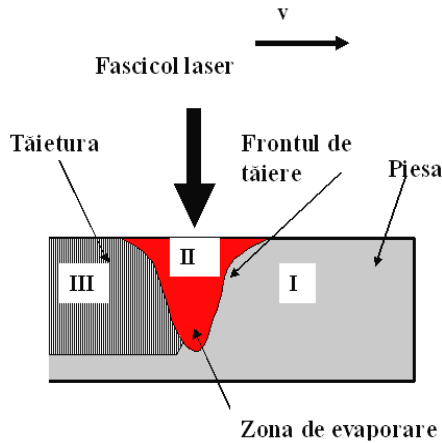


Fig. 1.13. Secțiune longitudinală a materialului supus tăierii laser de evaporare

Scopul modelării matematice este predicția formei fizice a frontului de tăiere, identificat prin izoterma temperaturii de vaporizare în zona iradiată. De regulă, modelarea analitică este însoțită de calcul numeric.

Efectul fasciculului laser este considerat ca o condiție la limită pe suprafața iradiată atunci când materialul iradiat este opac și absorbția se realizează la suprafața materialului. Atunci când sursa termică este volumică, aceasta se formulează ca un termen suplimentar al ecuației căldurii. Astfel [Abakians, 1998] a considerat o sursă termică volumică în material, pentru care coeficientul de extincție este proporțional cu densitatea materialului. Astfel absorbția fasciculului laser a fost modelată pentru un mediu "poros". Un astfel de mediu se produce la descompunerea termică a materialului când absorbția radiației se realizează în mediul semitransparent dat de produșii de descompunere a materialului și numai în mică măsură poate fi asociat cu suprafața materialului.

Pentru ecuația de conducție a căldurii în material, alături de efectul sursei termice date de fasciculul laser, se consideră și diferite pierderi de energie. Acestea sunt :

- conducția căldurii în materialul învecinat;
- pierderea căldurii pentru a realiza transformarea de fază (vaporizarea);
- pierderea căldurii prin radiație.

Câteva rezultate ale unei modelării analitice a tăierii laser sunt prezentate în fig. 1.14. Se observă că modelul tăierii laser de evaporare poate prezenta tăieturi care prezintă o formă gaussiană, dar și tăieturi cu pereții înclinați. Rezultatele acestui tip de model se regăsesc nu în forma tăieturii, ci în forma zonei afectate termic, deoarece la stabilirea zonei afectate termic apare numai conducția căldurii în material, pe când forma tăieturii este și rezultatul unor transformări de stare de agregare. Principala deficiență a modelului tăierii laser de evaporare este aceea că ignoră propagarea frontului de transformare de fază în material. Aceasta nu poate fi obținută din ecuația de conducție a căldurii. Importanța modelării matematice pentru

tăierea laser de evaporare constă în gradul general de aplicabilitate și flexibilitatea de a considera diferite fenomene fizice în același model.

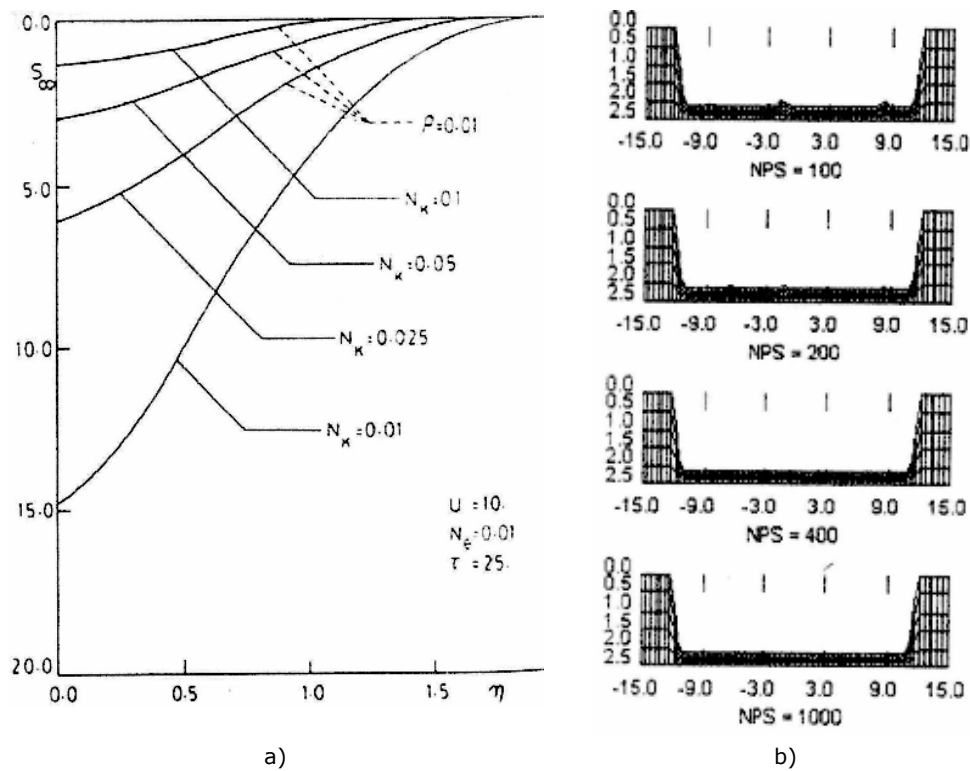


Fig. 1.14 Modelări ale zonei erodate în material a) Model analitic după Abakians,  $U$ ,  $N_e$ ,  $N_k$ ,  $\tau$  factori adimensionali pentru viteza de tăiere, putere emisă și absorbită, timp,  $\rho$ -densitatea vaporilor absorbanți, b) Model numeric după [Kim, 2001], NPS-numărul nodurilor rețelei modelului cu element finit

În procesele de tăiere laser se folosește un jet de gaz asistent pentru îndepărtarea materialului prelevat din zona iradiată. Pentru tăierea laser a materialelor compozite se folosește un jet de gaz neutru - azot. De obicei efectul reactiv al oxigenului din aer asupra materialelor polimerice este neglijat. Jetul de gaz este transmis coaxial către piesă. Gazul este transparent pentru radiația laser, intensitatea ridicată a fascicului laser, mai ales pentru laserul cu  $\text{CO}_2$  poate provoca apariția de plasmă atât în materialul iradiat, cât și în gazul asistent. Efectul gazului asistent de îndepărtare a materialului apare după penetrarea materialului, materialul erodat fiind îndepărtat pe la partea inferioară a piesei. Utilizarea gazului asistent, apare și pentru procese de prelucrare în care nu este penetrat materialul. În aceste cazuri, gazul asistent protejează lentila de focalizare și ajută la convecția liberă a vaporilor.

Pentru transmiterea jetului de gaz către piesă, se folosesc diverse tipuri de diuze, fig. 1.15. S-a arătat că propagarea liberă a jetului de gaz are loc în bucle, care

### 30 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

conțin o expandare apoi stângere a jetului de gaz, fig 1.16. Zonele de presiune constantă care apar în propagarea jetului de gaz sunt numite discuri de "shock". În aceste zone are loc îndepărtarea materialului prin exercitarea unei presiunii asupra sa. Principalul factor ce caracterizează gazul este presiunea din rezervor. Aceasta determină viteza de ieșire a jetului de gaz. Viteza de ieșire a gazului din duză determină propagarea liberă a gazului. Se remarcă două cazuri importante și anume propagarea gazului cu viteză subsonică și respectiv supersonică.

Interacțiunea gazului cu piesa și propagarea acestuia la frontul de tăiere, este diferită de propagarea liberă a gazului. Se poate simula propagarea jetului de gaz pentru o tăietură de dimensiuni date și cu o anumită formă a frontului de tăiere. Pe de altă parte, forma tăieturii și a frontului de tăiere depind de propagarea jetului de gaz la frontul de eroziune.

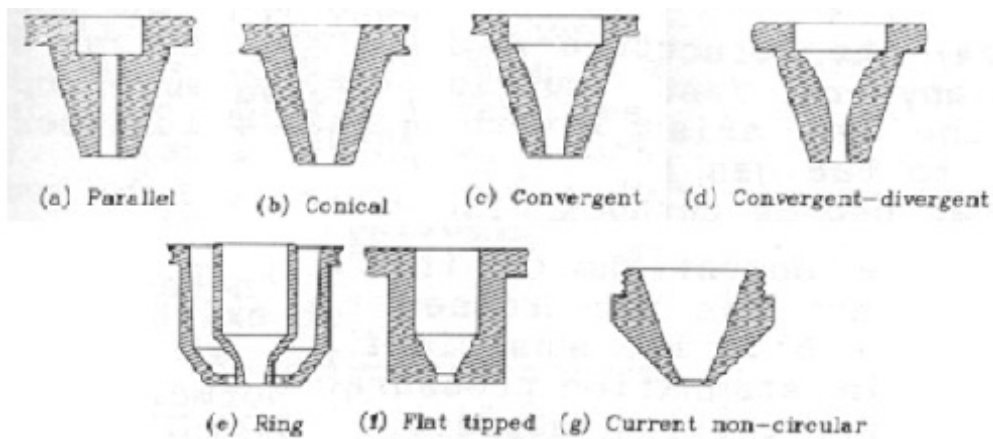


Fig. 1.15 Tipuri de duze utilizate pentru suflarea gazului asistent, după [Firet, 1999]

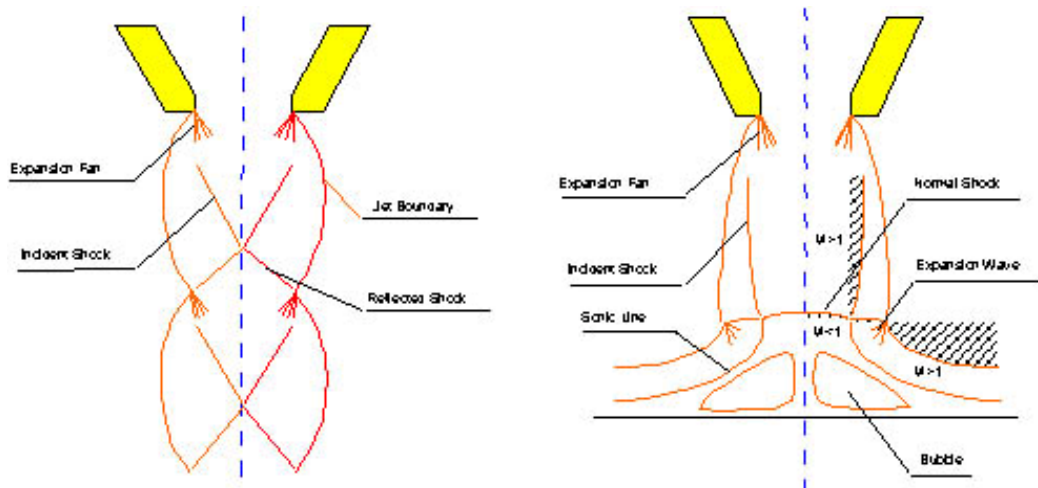


Fig. 1.16 Propagarea jetului de gaz a) Propagare liberă a jetului de gaz b) Propagarea jetului de gaz la suprafața piesei [Columbia. edu]

Pentru tăierea materialelor ceramice, penetrarea în material și descompunerea materialului pot fi asociate numai cu iradierea. Propagarea jetului de gaz poate fi studiată pentru o tăietură cu dimensiuni date. Folosirea de viteze de curgere a gazului supersonice duce la blocarea gazului la suprafața piesei. Se produce o curgere turbulentă a gazului care poate duce la scăderea presiunii și lipsa de efect a gazului asistent la frontul de tăiere. Pentru a împiedica aceste efecte se folosesc diuze cu loburi, fig. 1.17 care separă jetul de gaz în mai multe părți și asigură o propagare uniformă.



Fig. 1.17 Diuze profilate pentru curgerea supersonică a gazului asistent după [Firet, 1999]

Deși s-a arătat că vitezele supersonice de curgere a gazului pot provoca efecte nedorite, majoritatea sistemelor tehnologice folosesc aceste viteze. S-a arătat că folosirea unei presiuni ridicate a gazului asistent - ceea ce înseamnă și o viteză de ieșire ridicată, este o opțiune mai bună decât folosirea unei presiuni reduse. Pentru tăietura care ia naștere în urma iradierii materialului este importantă presiunea statică a gazului care se asigură deasupra piesei. Se urmărește ca jetul de gaz să ajungă cât mai concentrat la suprafața piesei. Astfel distanța dintre diuză și piesă este menținută la valori mici, până la 3 mm. În tăietură jetul de gaz se poate propaga cu unde de șoc paralele cu suprafața piesei, caz asociat cu o bună îndepărtare a materialului descompus din tăietură, sau să prezinte turbulențe (fig. 1.18). În interiorul tăieturii compoziția gazului asistent se schimbă prin preluarea de material erodat astfel că prin schimbarea densității se schimbă și caracteristicile sale dinamice [Columbia. edu] [Man].

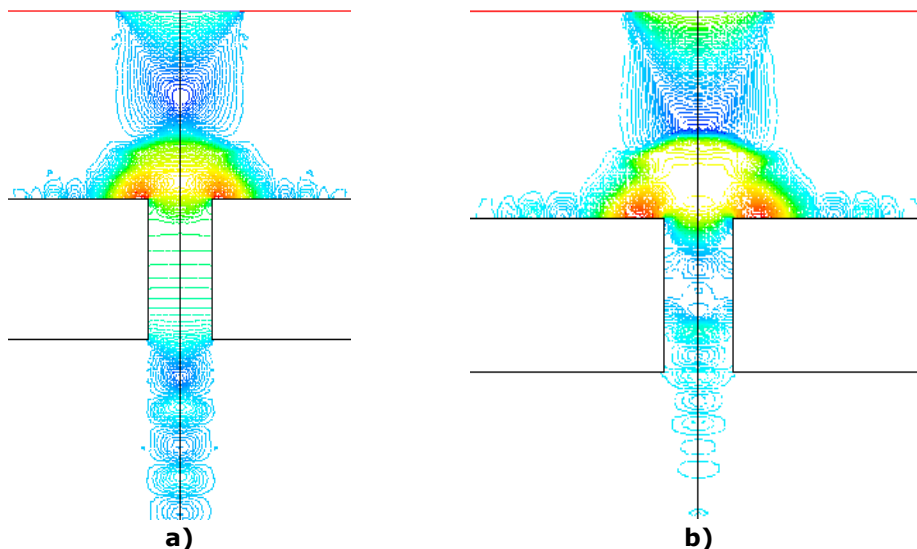


Fig. 1.18 Simulări ale curgerii jetului de gaz prin tăietură a) cu menținerea jetului de gaz, curgere uniformă b) cu producerea de turbulențe în tăietură [Columbia. edu]

### 32 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

**Regimuri de iradiere.** Mulțimea factorilor care influențează și condiționează interacțiunea fascicul laser – material iradiat în condițiile specifice prelucrării cu laser a materialelor industriale este prezentată în fig. 1.19:

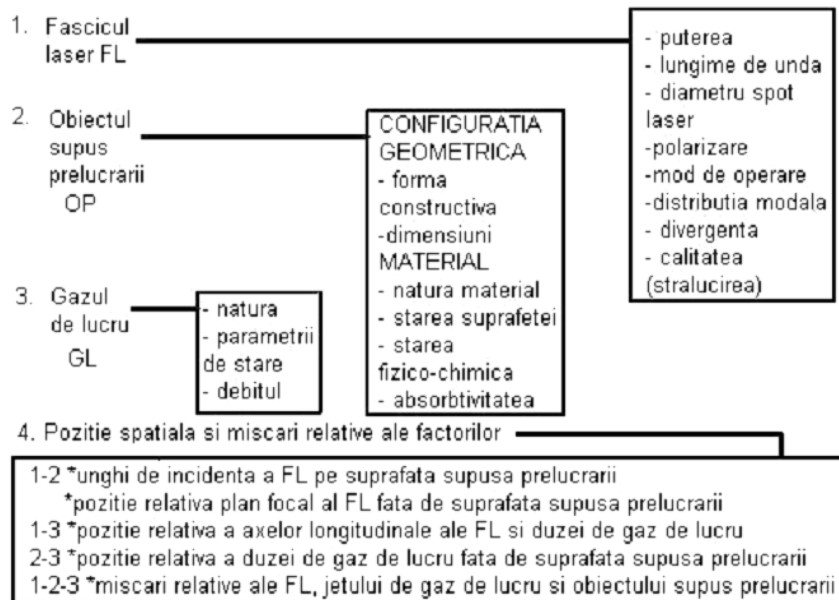


Fig. 1.19 Factori și parametri funcționali ai sistemelor tehnologice de tăiere cu laser [Nichici, 1977]

Din considerente practice care țin seama de construcția și posibilitățile de reglare a sistemelor laser actuale, o parte a acestor factori rămân invariabili în condițiile date, devenind factori de stare. Este vorba despre factorii legați de fasciculul laser FL, factorii legați de obiectul de prelucrat OP și factorii legați de gazul de lucru GL.

- factorii legați de fasciculul laser FL: lungimea de undă, polarizare, distribuția modală, divergența, calitatea;
- factorii legați de obiectul de prelucrat OP: natura materialului, starea suprafeței, structura fizico-chimică a materialului, absorbtivitatea, starea suprafeței;
- factori legați de gazul de lucru GL: natura gazului.

În mod similar, de pe poziții tehnologice, influența unora din factorii prezentați în fig. 1.19 poate fi considerată în prima fază de importanță secundară [Nichici, 1977] în cazul cercetării efectuate. În această categorie intră factorii tehnologici legați de:

- fasciculul laser FL: diametrul spotului laser, modul de operare;
- obiectul de prelucrat OP: forma constructivă;
- gazul de lucru GL: debit, factorii de stare ai gazului;



În consecință, în programul de experimentare considerat se vor introduce ca factori de influență semnificativi, factorii de influență care au permis punerea în evidență a legăturii cu funcțiile obiectiv stabilite:

- puterea laser  $P$  [W];
- poziția focarului față de suprafața de prelucrat  $\delta$  [mm];
- viteza mișcării relative fascicul laser – material iradiat  $v$  [mm/min];
- grosimea materialului  $e$  [mm].

Energia pulsului  $E_p$  [J] și poziția focarului față de suprafața de prelucrat  $\Delta F$  [mm] determină intensitatea  $I$  [ $W/cm^2$ ] și fluența  $F$  [ $J/m^2$ ] iradierii pe suprafața de cuplare a radiației laser cu substanța materialului și implicit efectele de interes tehnologic ale iradierii laser.

În cazul tăierii cu laser aplicată în cercetare, viteza controlează energia liniară laser introdusă în proces, și prin aceasta, este o măsură a eficienței și a productivității tehnologice a prelucrării.

Câteva date numerice pentru exemplificarea condițiilor de tăiere cu fascicul laser a unor materiale ceramice și polimerice sunt prezentate în *tabelele 1.2. și 1.3.*

Tabel 1.2 Date de tăiere pentru materiale ceramice cu laser  $CO_2$  pentru penetrare completă [Industrial Laser Annual Handbook, 1990]

Materialul	Grosimea [mm]	Viteza de tăiere [m/min]	Puterea [W]
Sticlă	1	1.5	500
	2	1	500
	3	0.5	500
Alumină	1	1.4	500
	2	0.6	500
	2	2.0	1000
Silica	1	0.6	1200
Placi ceramice	6.3	0.6	1200

Tabel 1.3 Date de tăiere pentru materiale termoplastice și compozite, cu laser  $CO_2$  [Industrial Laser Annual Handbook, 1990]

Materialul	Grosimea [mm]	Viteza de tăiere [m/min]	Puterea [W]
Formica	1.6	7.8	400
	1.6	14	1200
	3	2.8	400
Rășini fenolice	3	2.9	400
	6	1.1	400
Fibră de sticlă/ rășină epoxy	1.6	5.2	450
	1.6	15	1200
	3.2	2.4	400
	4.5	1.5	400

### 34 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

Se poate observa din *tabelul 1.3* că pentru materialul CEFS (rășini armate cu fibre de sticlă) viteza de tăiere depinde și de proporția pe care o reprezintă fibra de sticlă în material. Aceste valori au fost folosite ca reper pentru alegerea punctelor centrale ale planurilor experimentale pentru experimentele realizate. Aplicații ale tăierii laser pentru diferite materiale sunt prezentate în lucrările [Nichici 1991], [Pearsică, 2006], [Ream, 2004],[Zhang, 1998], [Zgură, 2000], [Jose,1999].

#### 1.3 Tăierea cu laser a materialelor compozite

Interesul pentru tăierea laser a materialelor compozite este confirmat de existența a numeroase investigații și cercetări științifice. În continuare sunt prezentate fragmente din sintezele bibliografice realizate de către autor în acest domeniu, cercetări experimentale pentru tăierea laser a unor materiale ceramice și polimerice. Acestea pot fi clasificate în:

- cercetări experimentale pentru tăierea laser a unor materiale polimerice;
- cercetări experimentale pentru tăierea laser a unor materiale ceramice dintre care se remarcă sticla ;
- materiale compozite cu matrice polimerică și armătură pe bază de fibre.

În lucrarea [Duphal, 2008], se prezintă relațiile între factorii de proces care apar în procesele de tăiere ale unor piese din material ceramic folosind fascicul laser cu Nd:YAG. Pe piesele cilindrice din alumina ( $Al_2O_3$ ) s-au realizat șanțuri. S-a folosit un plan experimental factorial cu 5 factori de influență și 5 nivele pentru fiecare factor. Verificarea statistică s-a realizat în raport cu 6 puncte situate central, în interiorul domeniului experimental și 10 puncte în afara domeniului experimental.

Ca factori de influență s-au considerat presiunea gazului asistent (aer), curentul aplicat oscilatorului laser care controlează indirect puterea, frecvența de pulsare, ciclul de pulsare și viteza de tăiere. Ca funcții obiectiv au fost utilizate abaterea de la dimensiunile șanțului pentru partea superioară și partea inferioară și pentru adâncimea șanțului. Modelele matematice obținute au fost de tip polinomial de ordinul doi. S-a utilizat metoda ANOVA pentru a verifica adecvanța modelelor empirice realizate.

În lucrarea [Huang, 2010], se investighează utilizarea laserului cu  $CO_2$  pentru realizarea unor semifabricate din PMMA pentru industria electronică. În prelucrările respective apare tăierea cu fascicul laser și producerea de canale în material. S-a analizat rugozitatea suprafețelor tăiate. S-a arătat că cea mai bună rugozitate obținută a fost de  $R_a=100,86$  nm. Se recomandă o preîncălzire a materialului la temperaturi între 70-90 °C.

În lucrarea [Eltawahni, 2010], se prezintă un experiment de optimizare pentru tăierea laser a polietilenei folosind fascicul laser cu  $CO_2$ . Puterea maximă a fascicului laser a fost de 1.5 kW. Plăcile au avut grosimi de 6,8 și 10 mm. Gazul asistent a fost aerul la presiuni de 2 și 3 bar. Pentru măsurarea rugozității suprafețelor interioare ale tăieturii s-a folosit un microrugozimetru cu precizia de 0.0001 mm. Factorii de influență variați în experiment au fost puterea fascicului

laser, viteza de tăiere, poziția planului focal în raport cu suprafața piesei (defocalizarea). Ca funcții obiectiv au fost considerate lățimea tăieturii la partea superioară respectiv inferioară, raportul între cele două lățimi ale tăieturii și rugozitatea suprafeței interioare a tăieturii. Modelul matematic prezentat au fost de tip polinomial de gradul 2. Planul experimental a fost de tip factorial compus.

La analiza rezultatelor experimentale s-a utilizat metoda ANOVA și metoda suprafețelor de răspuns. S-au formulat criteriile de optimizare atât asupra factorilor de influență variați, cât și asupra funcțiilor obiectiv analizate. Astfel, pentru puterea fasciculului laser se cere o valoare minimă, pentru viteza de tăiere se cere o valoare maximă și pentru raportul dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară se cere o valoare maximă. Se analizează calitatea și costul pentru procesul de tăiere laser.

În lucrarea [Black, 1998], se prezintă tăierea laser pentru PMMA. Se analizează mai multe rezultate experimentale pentru adaptarea vitezei de tăiere cu grosimea materialului, fig. 1.20. Se verifică mai multe relații empirice pentru corelația între putere și viteza de tăiere.

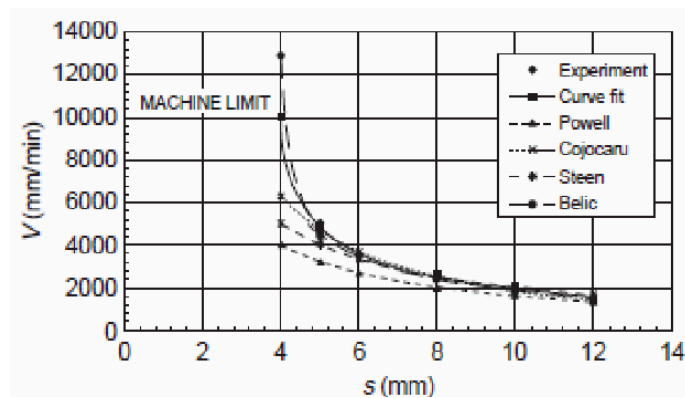


Fig. 1.20 Adaptarea vitezei de tăiere cu grosimea materialului pentru PMMA [Black, 1998](s grosimea materialului, v viteza de tăiere)

În lucrarea [Kurt, 2009], este studiată tăierea folosind laser cu CO<sub>2</sub> pentru mai multe tipuri de materiale polimerice utilizate în inginerie. Tipurile de materiale utilizate au fost PTFE și POM. S-au tăiat contururi curbe și pătrate, grosimea plăcii a fost de 3 mm. S-a măsurat rugozitatea suprafețelor și abaterile de la dimensiuni ale pieselor realizate și s-au variat presiunea gazului asistent, viteza de tăiere și puterea fasciculului laser. Au fost considerate trei nivele pentru fiecare din cei trei factori. Abaterile dimensionale constatate au fost sub 1 mm. Suprafețele interioare ale tăieturilor au fost observate la microscop. Se prezintă modele polinomiale liniare pentru valorile dimensiunilor pieselor în funcție de factori variați. S-a realizat un studiu statistic care a utilizat metoda ANOVA.

În lucrarea [Heihnlein, 2010], se prezintă un studiu experimental pentru tăierea cu fascicul laser a plăcilor subțiri din alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> folosind un laser Nd:YAG cu puterea de 500W și un laser cu CO<sub>2</sub> cu puterea de 200W. Pentru prelucrarea

### 36 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

datelor experimentale s-a folosit programul DOE care permite studiul statistic în vederea optimizării factorilor pentru procesele de prelucrare laser. În experiment s-au variat factorii: puterea fasciculului laser, viteza de tăiere, distanța dintre diuză și piesă, presiunea gazului asistent și poziția planului focal (defocalizarea). S-a analizat mărimea zonei afectate termic și au fost utilizate două metode de analiză statistică a datelor experimentale „Screening Design” și „Response Surface Design”. Au fost analizate separat tăieturile realizate cu cele două tipuri de laseri industriali utilizați.

În lucrarea [Davim, 2008], se studiază tăierea laser pentru PMMA folosind laser cu CO<sub>2</sub>. Grosimea plăcilor a fost de 6 mm, gazul asistent a fost azotul la presiunea de 0.5 bar și s-a analizat tăierea 2D a unui contur complex.

În experimente s-a variat puterea și viteza de tăiere, experimentele au fost organizate după serii experimentale clasice. S-a analizat mărimea zonei afectate termic și rugozitatea suprafeței interioare a tăieturilor și s-a arătat că:

- în general ZIT (zona afectată termic) crește cu puterea fasciculului laser și scade cu viteza de tăiere. Tăieturile realizate prezintă o dimensiune mică a ZIT, fără zonă arsă.
- tăierea conturilor bidimensionale prezintă o bună repetabilitate pentru setul de valori ale factorilor reglați.

În lucrarea [Choudhury, 2010] se studiază tăierea laser pentru trei materiale polimerice PP (polipropilenă), PC (polycarbonat) și PMMA (polimetil meta acrilat). S-a variat puterea, viteza de tăiere și presiunea gazului asistent (aer). Ca funcții obiectiv se studiază mărimea zonei afectate termic, rugozitatea suprafețelor și respectarea unor dimensiuni ale piesei. Se prezintă modele matematice polinomiale de ordinul 1 pentru dimensiunea ZIT și a rugozității. Adecvanța lor este studiată prin metoda de analiză a variațiilor ANOVA; se prezintă modele matematice în care apare produsul factorilor. Pentru fiecare factor variat s-au considerat 3 nivele. S-au studiat abaterile de la dimensiunile prescrise pentru piesele realizate de formă circulară și dreptunghiulară. Se observă același tip de deviații pentru cele trei tipuri de materiale, relativ la condițiile experimentale utilizate, deși materialele au proprietăți termice diferite.

În lucrarea [Yang, 2010], se prezintă experimente în care s-a urmărit fracturarea mai multor straturi de sticlă cu grosimea de 2.5 mm. S-au folosit în experimente puteri între 50-300W și viteze de tăiere 3-19 mm/s, diametrul fasciculului laser a fost între 2.5 - 5 mm. S-au folosit mai multe poziții ale planului focal în raport cu suprafața piesei. S-a arătat că radiația emisă de laserul cu CO<sub>2</sub> este absorbită la suprafața piesei, iar cea emisă de laserul cu Nd:YAG în interiorul piesei. Se prezintă simulări cu programul ANSYS pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor

În lucrarea [Yamamoto, 2010], se arată că sticla „aluminium-silicate glass” are un coeficient de dilatare termică mai redus decât alte tipuri de sticlă, ceea ce o recomandă pentru folosirea la construcția măștilor pentru LCD-uri. Metoda numită „scribing” constă în separarea a două părți prin fisurarea controlată a sticlei. Aceasta este încălzită cu un laser cu CO<sub>2</sub> iar apoi este răcită cu apă. Se obțin tăieturi cu muchii drepte, cu puține fisuri. În experimente s-a folosit o putere medie a fasciculului laser de 58,7 W și viteza de scanare de 150 mm/s, placa de sticlă a

având grosimea de 0.7 mm. Se prezintă modelări cu elemente finite pentru câmpul termic și pentru tensiunile din material.

În lucrarea [Wang, 2007], se prezintă experimente de clivaj pentru plăci de sticlă „soda-lime glass”. S-a folosit o lentilă cilindrică pentru a forma un spot eliptic cu axa mare de 15 mm și axa mică de 0.7 mm. S-a folosit o putere de 42 W și o viteză de tăiere de 5000 mm/min. În experimente s-a rotit suprafața sticlei în raport cu fasciculul laser. S-a modelat ciclul termic și condițiile de obținerea a fracturării sticlei cu programul ABAQUS.

În lucrarea [Nisar, 2009], se prezintă tăierea laser pentru sticlă folosind diode laser. Tăierea se realizează prin ruperea (clivarea materialului), se prezintă condițiile de realizare a fracturării controlate a plăcilor de sticlă. Se prezintă modele cu element finit, iar fasciculul laser este focalizat deasupra piesei.

În lucrarea [Nikumb, 2005], se prezintă modalitățile de producere a găurilor și a canalelor mici în sticlă. Acestea sunt utile pentru a realiza fibre optice și alte prelucrări de precizie. S-a folosit laser Nd:YAG triplat în frecvență, cu emisie în domeniul UV. Se arată posibilitatea de a decupa forme complexe și se analizează rugozitatea suprafeței prelucrate.

În lucrarea [Mitsubishi, 2008], se prezintă un studiu asupra prelucrărilor pe sticlă de siliciu folosind laser cu emisie în domeniul UV, cu pulsuri de ordinul ns. S-a arătat că adâncimea șanțurilor și găurilor obținute este proporțională cu numărul pulsurilor. S-a realizat topirea sticlei. A fost folosit un strat de particule absorbante la suprafața sticlei.

În lucrarea [Kuo, 2008] se prezintă experimente de clivare a sticlei cu fascicul laser. S-a folosit atât laser cu CO<sub>2</sub> cu iradiere în regim continuu, cât și laser cu Nd:YAG în regim pulsant. Utilitatea iradierii combinate constă în faptul că laserul Nd:YAG prezintă un coeficient de absorbție ridicat pentru materialul topit. Se prezintă modelări cu element finit al tensiunilor induse în material.

În lucrările [Jiao, 2008] și [Jiao, 2009], se prezintă tăierea laser cu CO<sub>2</sub>, folosind două spoturi laser suprapuse. Primul formează o pată mai mare pe suprafața piesei care asigură preîncălzirea materialului, având o intensitate mai mică iar al doilea în centru, cu intensitate ridicată care realizează tăierea.

În lucrarea [Caiazza, 2005] se prezintă tăierea cu laser CO<sub>2</sub> cu puterea maximă de 1.5 kW a unor materiale polimerice termoplastice, cum ar fi polietilenă (PE) polipropilenă (PP) și policarbonat (PC). Studiul s-a concentrat pe determinarea vitezei de tăiere critice la care pot fi tăiate diferite grosimi de material. S-a măsurat lățimea tăieturii la partea superioară a piesei și lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei și s-a exprimat volumul de material îndepărtat sub forma debitului prelucrării. Planul experimental a considerat o asociere între creșterea puterii și creșterea vitezei de tăiere. S-au folosit plăci cu grosimi de 3 mm și 5 mm, puteri 200-1400W, viteze de tăiere 1-6 m/min. S-au realizat măsurări ale rugozității suprafeței interioare a tăieturilor. Dintre rezultatele experimentale obținute se remarcă o valoare a vitezei critice de 1.1 m/min asociată cu o putere de 500W pentru PE.

În lucrarea [Yung, 2007] se prezintă experimente de găurire folosind laser cu Nd:YAG pentru un material compozit – rășini epoxidice/ aluminium nitrite. Acesta

### 38 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

este un material compozit de tip polimeric/ceramic folosit ca suport pentru circuite electrice. S-a studiat găurirea acestui material folosind laser Nd:YAG cu puteri între 0.2 – 1.2 W, repetări ale pulsului de 12-48 ori și frecvențe de pulsare 3-20KHz. Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele pentru rășina epoxidică pură. S-a arătat că factorul care are cea mai mare importanță pentru controlul procesului de prelucrare este frecvența de pulsare.

În lucrarea [Pan, 1998] se studiază tăierea laser a unor materiale compozite care au ca armătură fibra de sticlă iar ca matrice polipropilena și respectiv fibre de carbon în matrice de rășini epoxidice. Între materiale, pe baza fibrei de sticlă au existat diferențe în ceea ce privește raportul volumic dintre matrice și fibră în material și un tip de material studiat a avut fibre unidirecționale.

Scopul lucrării a fost modelarea zonei afectate termic prin modelare termica. Modelarea a avut două părți, estimarea conductivității termice a materialului cu valori diferite pe cele trei axe de coordonate, respectiv căldura latentă pentru vaporizarea fibrei de sticlă este estimată la 31000kJ/kg. Experimentele au fost realizate folosind două sisteme tehnologice laser cu CO<sub>2</sub> de 1000 și respectiv 1500 W cu diametre ale spotului laser de 0.17, respectiv 0.25 mm. S-au realizat șanțuri pe suprafața materialului. Nivelul puterii a fost între 350 și 1500 W, iar iradierea s-a realizat în regim continuu, viteza de tăiere având valori între 2.5-110 mm/s, ca și gaz asistent s-a folosit azotul transmis către piesă coaxial cu fasciculul laser. Prelucrarea s-a realizat în atmosferă protejată.

Plăcile fibră de carbon/epoxy au avut grosimea de 8 mm, iar cele de fibră de sticlă/polipropilenă au avut grosimea de 3.5 mm. S-a analizat teoretic și experimental variația zonei afectate termic cu puterea și cu viteza de tăiere. S-a arătat o scădere a zonei afectate termic cu viteza de tăiere și menținerea aproape constantă a acesteia cu puterea.

În lucrarea [Nasedkin, 1999], se prezintă tăierea materialului compozit pe bază de fibre de aramidă și matrice de plastic (rășini epoxidice) AFRP (Aramide fiber reinforced in plastics). Se compară rezultatele obținute pentru tăierea laser și pentru tăierea mecanică. S-a obținut o creștere a rezistenței mecanice între 4-25% pentru probele tăiate cu laser și s-a arătat că umiditatea absorbită în material scade de două ori. S-a arătat că pentru grosimea materialului de 2 mm, are loc o deviație între partea superioară și partea inferioară a tăieturii. S-au determinat posibilitățile de tăiere a materialului pentru grosimi ale plăcilor până la 6 mm. S-au identificat zonele arse și zonele afectate termic pe tăietură.

În lucrarea [Davim, 2008], se prezintă tăierea laser a unor materiale polimerice și compozite folosind laser cu CO<sub>2</sub>. S-a studiat zona arsă și zona afectată termic din material. Se prezintă experimente pentru tăierea materialului rășini epoxidice armate cu fibre de sticlă cu grosimea de 2 mm la puterea de 380 W, viteza de tăiere de 2000 - 4000 mm/min folosind gaz asistent azot la presiunea de 4 bar. S-au efectuat trei măsurători pentru zona afectată termic și s-a considerat valoarea medie a acestora. Se compară zonele afectate termic și zonele arse pentru PMMA, PP (Polipropilenă), PC (Policarbonat), Epoxy+GF și Phenolic+AF, fig. 1.21, 1.22.

Din figurile anterioare se observă că pentru rășinile epoxidice armate cu fibră de sticlă, zonele afectate termic sunt mari, iar zonele arse sunt mici. Viteza de tăiere de 3000 mm/min a condus la afectarea termică considerabilă a materialului.

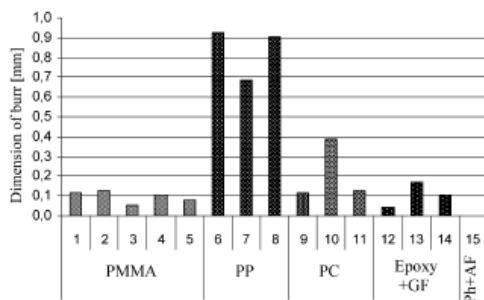


Fig. 1.21 Comparație între dimensiunea zonei arse pentru materiale polimerice și compozite cu matrice polimerică [Davim, 2008]

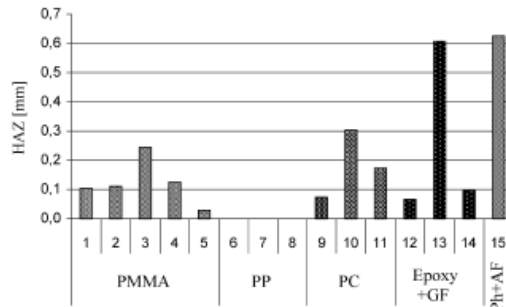


Fig. 1.22 Comparație între dimensiunea zonei afectate termic pentru materiale polimerice și compozite cu matrice polimerică [Davim, 2008]

Avantajele presupuse ale procesului de tăiere cu fascicul laser depind de natura termică a procesului de prelucrare, care nu implică nici o forță mecanică aplicată materialului. Totuși, unele probleme pot să apară din cauza proprietăților termice diferite ale fibrelor și ale matricei.

Fibrele din materialele compozite prezintă de obicei un înalt nivel de absorbție a radiației din infraroșu, tipice laserului cu CO<sub>2</sub>. Mecanismul de degradare termică care duce la îndepărtarea materialului este puternic influențată de natura materialelor din compoziția sa (fibre și matrici).

Spre exemplu, diferența proprietăților termice dintre fibre și matrici este foarte mare atât pentru grafit cât și pentru fibra de sticlă, în timp ce aceste tip de diferențe sunt foarte mici în cazul fibrelor aramide. [Columbia edu]

Energia necesară pentru evaporarea fibrelor este mai mare decât cea necesară în cazul matricelor; astfel energia necesară laserului pentru a tăia fibrele materialului compozit va fi dependentă de tipul de fibre și de particulele din volum (adaosuri sau viduri).

În cazul intensităților mari, timpul necesar pentru evaporare este foarte scurt, dar, datorită proprietăților termice diferite, fibrele și matricile pot prezenta valori foarte diferite ale timpului necesar pentru evaporare.

Este posibil să se observe două condiții limită în cazul unei energii specifice constante:

- atât fibrele cât și matricile dezvoltă timpi de evaporare puțin diferiți, ca de exemplu în cazul rășinilor de poliester și a fibrelor aramide. Astfel, comportamentul compozitelor din punct de vedere termic va putea fi considerat asemănător cu cel al unui material omogen.

#### 40 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

- atunci când fibrele și matricile prezintă timpi de evaporare foarte diferiți, de exemplu rășini/grafit sau rășini/ fibra de sticlă, rășina își atinge temperatura de evaporare în timp ce fibrele nu sunt încă afectate.

A fost demonstrat faptul că pătrunderea căldurii în straturi și respectiv extinderea zonei afectate de căldură sunt mai mari datorită unei înalte conductivități ale fibrelor [Tagliaferri, V. et al.1985]. Pentru laminatele 0/90 degradarea termică este prezentată în *figura 1.23*, ca o funcție a timpului de interacțiune: acesta este timpul în care fasciculul laser iradiază o zonă a materialului și este calculat ca și raportul dintre diametrul fasciculului laser și viteza de avans.

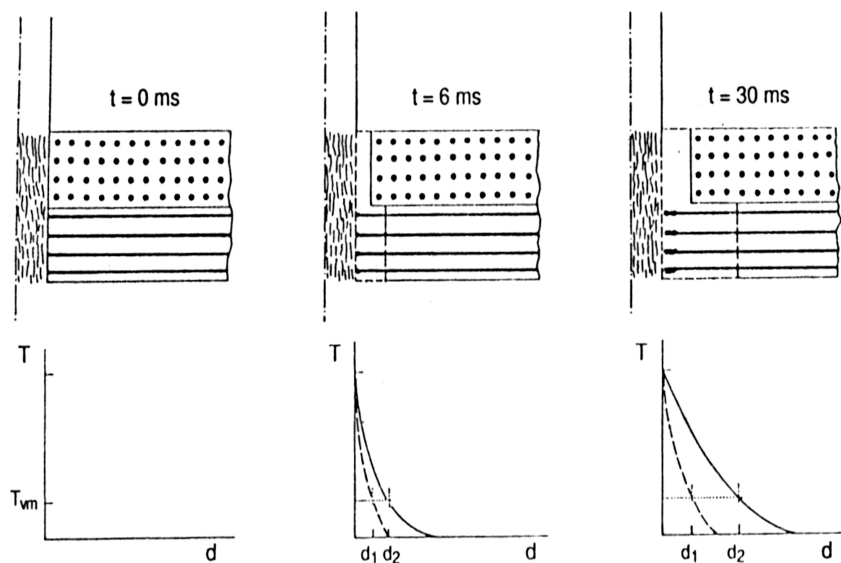


Fig. 1.23 Schema degradării termice (Tagliaferri, V. et al.1985), [Columbia edu] (T-temperatura, t-timpul, d-penetrarea în material pentru care are loc degradarea termică)

Procesarea laser a compozitelor se bazează pe efectele termice induse de fascicul în obiectul de prelucrat, prelevarea de material realizându-se, preponderent, prin vaporizare. Se precizează că energiile necesare prelevării de material sunt inferioare celor necesare prelevării metalelor. În momentul de față, cel mai răspândit procedeu laser aplicat materialelor compozite este tăierea. În general, aceasta se face cu laser CO<sub>2</sub>, deoarece fibrele introduse în matrice prezintă, în cea mai mare parte, absorbție ridicată a radiației în domeniul infraroșu.

Deși, de obicei sistemele de tăiere cu laser au costuri destul de ridicate, acest tip de tăiere aplicat materialelor compozite prezintă câteva avantaje semnificative:

- o lățime a secțiunii tăieturii foarte mică;
- deteriorarea limitată a materialului;
- viteza de tăiere foarte mare.



### 1.3 Tăierea cu laser a materialelor compozite 41

Spre exemplu, pentru materialele cu fibră aramidă, se pot obține cu ajutorul prelucrării cu fascicul laser viteze de tăiere de 2.5 ori mai mari decât în cazul tăierii mecanic [Columbia edu].

S-au făcut mai multe investigații în legătură cu operațiile de tăiere și găurire cu ajutorul laserului în cazul materialelor polimerice. Tăierea materialelor compozite de tip sticlă/poliester, grafit/poliester și aramidă/poliester a fost realizată pentru a se stabili grosimea de material care poate fi tăiată. Aceasta variază de la 2 mm în cazul grafit/poliester până la 4.5 mm pentru Kevlar/poliester. [Chryssolouris, 1991] [Columbia edu]

În tab 1.4 sunt câteva date reprezentative pentru tăierea cu laser a câtorva tipuri de materiale compozite. Se observă că puterea fasciculului laser variază între 300 W și 2000 W. A fost folosit un jet coaxial de heliu. Viteza a variat între 0.5 și 3.5 m/min. Folosind un fascicul laser în undă continuă de 1000 W și urmărind vitezele aflate între valorile 17 și 34 mm/s, a fost realizată tăierea unei piese Kevlar/epoxid cu grosime de până la 9.5 mm. [Chryssolouris, 1991] ; [Ion, 2005] ; [Columbia.edu]

Tabel 1.4. Date reprezentative pentru tăierea cu fascicul laser a materialelor compozite [Chryssolouris, 1991]

Material	Tipul de laser	Puterea laser	Viteza de tăiere	Adâncimea tăieturii	Lățimea tăieturii
Aramid /poliester	CO <sub>2</sub>	800 W	0,5 m / min	2 mm	0,6 mm
Sticlă / epoxy		1 KW	2 m / min	5 mm	0,5 mm
Sticlă / poliester		800 W	0,5 m / min	2 mm	
Grafit / epoxy		1 – 2 KW	15 – 120 mm / s	1 – 4 mm	
Grafit / epoxy		300 W	5 mm / s	1 mm	0,1 mm
Grafit / poliester		800 W	0,5 m / min	2 mm	0,5 mm
Kelvar / poliester		900 W	1 m / min	4,5 mm	0,2 mm
Kevlar / epoxy		150 –1000 W	34 mm / s	3,2 – 9 mm	0,1 mm

Folosirea fasciculului laser în regim pulsant a îmbunătățit în mod semnificativ viteza de tăiere pentru materialele compozite cu fibră de sticlă (Konig W. et al. 1985), [columbia edu]. Una dintre caracteristicile tăierii cu laserul este relația dintre eficiența tăierii, direcția fasciculului laser și orientarea fibrelor [Mathew, 1999], [Migliore, 1997].

Datorită anizotropiei materialelor, răspunsul termic al piesei la fasciculul laser depinde de direcția de tăiere. Acest efect este mult mai ușor de observat la compozitele cu fibre de grafit, unde proprietățile termice dintre componentele materialului compozit sunt foarte diferite.

În timpul experimentelor efectuate pe un compozit cu o singură direcție a fibrelor [Flaum, M and T. Karlsson, 1987], [Columbia edu] s-a observat că pierderile de căldură au fost maxime și viteza de tăiere a fost minimă atunci când fibrele se

## 42 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

găseau în poziție ortogonală față de direcția de tăiere; la acest tip de orientare fluxul de căldură este de-a lungul direcției fibrelor.

Calitatea tăierii, depinde foarte mult de viteza de tăiere, de energia laserului și de gazul folosit. Un jet de gaz inert și coaxial (He și Ar) poate fi folosit în procesul de tăiere pentru a reduce afectarea termică majoră a materialului

În general, calitatea tăierii este mai bună în cazul compozitelor care sunt formate din materiale cu proprietăți termice asemănătoare (ca de exemplu Kevlar/poliester).

Materialele de tip grafit sau fibră de sticlă prezintă rezultate mai slabe din cauza temperaturii foarte înalte necesară pentru evaporarea fibrelor și a conductivității termice ridicate a grafitului. Compozitele cu grafit sunt mai puțin potrivite pentru tăierea cu laser din cauza conductivității fibrelor și a temperaturii de evaporare. Două tipuri de degradare au fost găsite în cazul procesului de tăiere:

1. degradarea suprafeței din cauza efectelor conductivității termice (mod de degradare primară) care a fost localizată în secțiune în apropierea zonei unde fasciculul intră prima dată;
2. deteriorarea suprafeței din cauza gazului folosit (mod de degradare secundar) acest lucru se întâmplă mai ales în zona de ieșire a fasciculului laser.

În cazul experimentelor făcute pe grafit/epoxid, zona afectată de caldura din secțiune este mai mare la intrare decât la ieșire. Rezultatele experimentului disponibile în literatura [Konig, W., et al., 1985], [Columbia edu] susțin utilitatea laserului în tehnologia tăierii la următoarele tipuri de materiale compozite:

- materiale compozite cu fibră de carbon (fig. 1.24.)
- materiale compozite cu fibră de sticlă (fig. 1.25.)
- materiale compozite cu fibră aramidă (fig. 1.26.)

Marginea tăieturii obținută la 0.5 m/min este prezentată în fig. 1.24. Pierderile din matrice, dintre straturi sunt mai mari decât cele observate în cazul altor materiale, totuși, fibrele par să fie tăiate la aceeași lungime. Fundul cavităților este fin și nu prezintă nici un fel de material carbonizat. Fotografiile microscopice arată faptul că, pentru o energie dată a laserului, marginea tăieturii este puternic influențată de viteza de tăiere.

Fig 1.25 prezintă marginea tăieturii obținută la 0.5 m/min: stratul ars rezultat din tăietură este vizibil în partea dreaptă în timp ce zona de jos este prezentată în partea stângă a figurii. Cea din urmă pare a fi foarte neregulată, o pierdere remarcabilă din matrice fiind evidentă în timp ce fibrele nu prezintă o tăietură curată. La viteze de tăiere de peste 0.5 m/min nu poate fi observată nici o îmbunătățire evidentă.

Fotografierea microscopică a unei suprafețe tăiate este prezentată în fig 1.26. La nivel microscopic strierea este vizibilă, striajiile sunt așezate aproape paralele cu direcția de tăiere și par să fie mai pronunțate în zona de intrare a fasciculului laser. Suprafața pare să fie neregulată din cauza pierderilor de material, mai ales longitudinal, paralel cu straturile și aceasta pare să fie mai mare în zona de intrare a fasciculului laser. Forma longitudinală a materialului ce a fost îndepărtat ca de altfel

și prezența unor fibre longitudinale sugerează că multe dintre fibrele aflate pe direcția de țesere au fost înlăturate odată cu rășinile. Fibrele de pe direcția de țesere nu prezintă o tăietură curată, ci, mai degraba, un capăt carbonizat. Pe de altă parte, marginea finală a striațiilor longitudinale pare să fie fină și fără nici un fel de reziduuri carbonizate.

Pierderile neuniforme de material par să depindă de matricea și fibrele materialelor alese. Această pierdere este puternic dependentă de conductivitatea termică a materialelor componente.

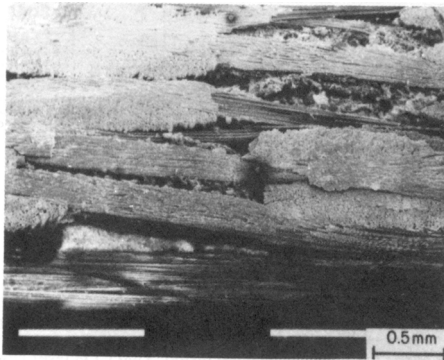


Fig. 1.24 Fotografie la nivel microscopic la tăierea cu fascicul laser a unui material compozit cu fibre de carbon [Columbia edu]

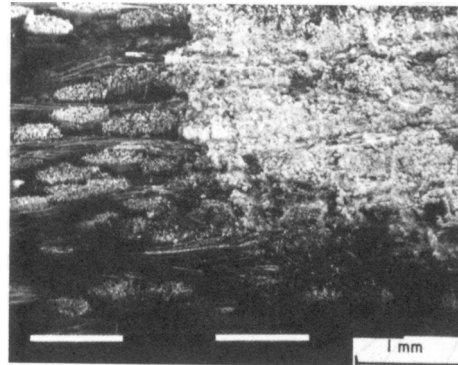


Fig.1.25. Fotografie la nivel microscopic la tăierea cu laser a unui material compozit rășini cu fibre de sticlă [Columbia edu]

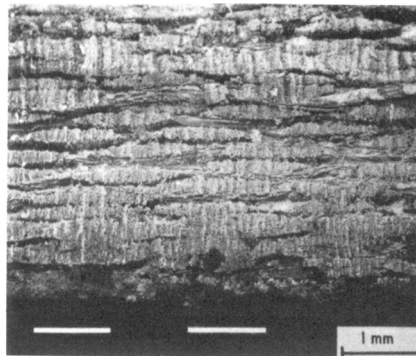


Fig. 1.26. Fotografie la nivel microscopic la tăierea cu fascicul laser a unui material compozit rășini cu fibre aramide [Columbia edu]

Fibrele aramide au, din punct de vedere termic, caracteristici similare cu cele ale materialelor cu matrice polimerică, deci comportamentul materialului în timpul interacțiunii dintre el și fasciculul laser este similar cu cel al materialelor omogene. Fotografiile la nivel microscopic ale suprafeței secțiunii în cazul aramidă/epoxid prezintă o suprafață relativ fină între regiunile cu fibre și cele cu matrice.

Totuși, fibrele de grafit prezintă valori ale conductivității termice mai mari cu două ordine decât în cazul materialelor cu matrice polimerică. Acest fapt duce la o

#### 44 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică

---

conductivitate a căldurii direcționată în piesa care trebuie prelucrată și la o zonă mult mai mare afectată din punct de vedere termic decât în cazul altor materiale.

De asemenea, zona deteriorată termic tinde să se propage de-a lungul direcției în care sunt orientate fibrele. Fibrele de sticlă pot fi eliminate prin topire în loc de evaporare. Acest fenomen poate duce la o asperitate crescută a suprafeței sau la neregularități în ceea ce privește lungimea fibrelor, din cauza prezenței de material care a fost topit și apoi s-a resolidificat [Columbia edu].

Una din problemele care apar în cazul prelucrării materialelor compozite cu ajutorul laserului este că, produsele rezultate din descompunerea chimică realizată la temperaturi ridicate pot fi toxice. Analize de spectrometrie (a maselor) de masă și de cromatografie a gazelor au fost realizate pe mostre de gaz în timpul tăierii cu laserul a materialelor de tip grafit/epoxid, aramidă/epoxid și sticlă/epoxid [Flaum, M and T. Karlsson, 1987].

Produsele particulare au fost pulberi fragmentate a materialelor cu fibre. Din descompunerea matricelor au rezultat emanații de CO, CO<sub>2</sub> și componente organice cu molecule mici. A fost demonstrat faptul că tăierea aramidei/epoxidei produce mari cantități de nitril de hidrogen, care prezintă un adevărat risc pentru sănătate, tăierea acestor materiale este în concluzie toxică. [Columbia edu], [Ion, 2005]

### 1.4 Obiectivele tezei de doctorat

Utilizarea materialelor compozite în industrie a cunoscut o dezvoltare importantă. Aceasta a coincis cu dezvoltarea prelucrărilor cu fascicul laser folosind sistemele tehnologice laser cu CO<sub>2</sub> și Nd:YAG. Materialele compozite prezintă multiple categorii și caracteristici particulare ale structurii care ajung să difere până la nivel de producător.

În acest context, problema reglajului factorilor pentru procesele de prelucrare laser și optimizarea tehnologică sunt probleme deschise. Dificultățile unei asemenea abordări sunt legate:

- în primul rând, de structura eterogenă a materialului compozit și de reacția diferită a componentelor acestuia la iradierea și încălzirea susținută de laser;
- în al doilea rând, de slaba cuplare inițială a radiației laser Nd:YAG (lungime de undă 1,06 μm) cu materialele polimeric și ceramic din constituția compozitului;
- în al treilea rând, de caracterul instabil și de cunoașterea insuficientă, teoretică și mai ales practică, a proceselor de transfer de energie și masă dezvoltate în condițiile date și a efectelor tehnologice induse de acestea.

Tăierea laser este procesul industrial cel mai utilizat la prelucrarea materialelor compozite. Acesta este utilizată datorită productivității ridicate, traiectoriilor bi- și tri-dimensionale și tăieturilor subțiri care pot fi realizate, reducerii pierderilor de material și posibilității de tăiere a unor materiale greu prelucrabile prin tehnologii clasice (dure și fragile).

Clasa de materiale CEFS are o utilizare largă, ce poate avea diferite componente, forme și structuri. Aplicarea tăierii laser pentru aceste tipuri de materiale compozite este la început, din acest motiv lucrarea de față își propune un studiu teoretic și experimental asupra tăierii laser a materialului CEFS în condițiile în care materialul a fost realizat în condiții specifice pentru producția de semifabricate de serie.

Obiectivele principale ale cercetării doctorale au fost modelarea matematică a legităților de cauzalitate care guvernează procesele de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică și respectiv evidențierea, cu ajutorul acestor modele, a celor mai favorabile regimuri de tăiere din punct de vedere tehnologic și energetic. În acest fel, rezultatele cercetării pot fi nemijlocit utilizate în proiectarea rațională a proceselor de tăiere laser investigate, aplicate la scară industrială.

Pentru realizarea acestor obiective s-a pornit de la o sinteză bibliografică urmată de o structurare a cunoștințelor legate de tăierea laser și în final aplicarea experimentală a tăierii laser.

Aceste obiective ale cercetării sunt justificate de nevoia de clarificare a unor probleme de nivel teoretic și experimental insuficient abordate în studiile existente pentru tăierea cu fascicul laser a materialului CEFS (compozit-epoxi-fibră de sticlă, ceea ce caracterizează un material compozit cu matrice polimerică epoxidică și armătură din fibră de sticlă).

În ceea ce privește evaluarea posibilităților de continuare a cercetării disponibile pentru autor, ar putea fi posibilă solicitarea de prelucrare a unui material CEFS la nivel industrial românesc, material care să îndeplinească toate cerințele rezultate din concluziile lucrării, și aplicarea tăierii cu laser Nd:YAG pentru obținerea unor rezultate favorabile din toate punctele de vedere.

## 1.5 Concluzii parțiale

În Capitolul 1 se prezintă elementele ale cunoașterii, care stau la baza aprofundării și aplicării tăierii cu fascicul laser a materialelor industriale, în particular a materialelor de tip CEFS, materiale compozite cu matrice epoxidică și armătură fibră de sticlă.

În principiu, fasciculul laser focalizat pe suprafața materialului produce o sursă termică concentrată, care induce efecte termice specifice în material. În urma acestui proces, pot avea loc fenomene de încălzire, topire, vaporizare, descompunere termică etc. a materialului iradiat. (descompunerea structurii materialului,). Cel mai des, materialul prelevat este îndepărtat din tăietură cu ajutorul gazului asistent, ceea ce asigură propagarea stabilă a frontului de tăiere în material.

#### **46 Stadiul actual al tăierii cu laser a materialelor compozite cu matrice polimerică**

---

Pentru realizarea efectivă a tăierii cu fascicul laser se remarcă trei etape distincte:

- a - penetrarea materialului iradiat
- b - formarea frontului de eroziune
- c - propagarea frontului de eroziune în material.

Se remarcă două tipuri de fenomene fizice care apar în procesul de tăiere cu fascicul laser a materialelor: fenomenele termice produse de fasciculul laser și fenomene legate de propagarea jetului de gaz la frontul de tăiere. La fenomenul termic, se prezintă principalele probleme ale aplicării modelului de tăiere laser prin evaporare.

Se arată că acest model poate fi generalizat pentru procesele de tăiere laser în care se produce descompunerea materialului

Se identifică factorii care intervin în procesul de tăiere laser, aceștia se clasifică în factori care controlează iradierea materialului și factori care controlează propagarea jetului de gaz asistent.

Se arată că viteza de tăiere intervine atât în condițiile de iradiere cât și în cele legate de desfășurarea generală a procesului de tăiere.

Se prezintă rezultate semnificative ale unor cercetări experimentale pentru tăierea laser a materialelor nemetalice, între care materiale ceramice, sticlă, materiale polimerice termoplaste și termorigide, materiale compozite cu matrice polimerică și diferite tipuri de armături în scopul înțelegerii și aprofundării creative a conținutului original al cercetării doctorale. Se prezintă logica, obiectivele și metodica programului de cercetare doctorală.

## 2. OBIECTIVE, STRATEGII, PROGRAME ȘI METODE DE CERCETARE EXPERIMENTALĂ

### 2.1 Strategii ale cercetării experimentale

Așa cum s-a arătat în capitolul anterior, principalele obiective asumate ale tezei de doctorat au fost modelarea matematică a legităților de cauzalitate care guvernează procesele de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică și respectiv evidențierea, cu ajutorul acestor modele, a celor mai favorabile regimuri de tăiere din punct de vedere tehnologic și energetic. În acest fel, rezultatele cercetării pot fi nemijlocit utilizate în proiectarea rațională a proceselor de tăiere laser investigate, aplicate la scară industrială.

Programul de cercetare experimentală conceput de autor a avut ca scop investigarea cantitativă și calitativă a tăierii laser Nd:YAG pentru un material compozit din clasa CEFS material compozit constituit dintr-o matrice polimerică (rășină epoxidică) și o armătură din fibră de sticlă.

Principalul purtător de informație asupra eficienței proceselor de tăiere investigate a fost tăietura efectiv realizată, caracterizată geometric, substanțial și energetic. În mod firesc (p.2.4.), stabilirea funcțiilor obiectiv reprezentative și selecția factorilor de influență semnificativi ai proceselor de tăiere s-au raportat la aceeași tăietură, considerată static și dinamic.

Tăierea cu fascicul laser a acestui tip de material este încă relativ puțin aplicată în industrie, iar experimentele realizate asigură o bază de date pentru promovarea și dezvoltarea de tehnologii noi, competitive pentru procesarea materialelor compozite.

Pe plan strategic, conceperea programului experimental a avut în vedere cele două metode de principiu ale structurării, organizării și prelucrării datelor unei cercetări experimentale și anume [Nichici, 2004] metoda Gauss-Seidel (fig. 2.1.sus) și metoda Box-Wilson (fig. 2.1. jos.).

Prima metodă, considerată uzual drept **experiment clasic** se bazează pe modificarea unui singur factor de influență la un moment dat, adică în fiecare din încercările succesive. Ceilalți factori existenți, considerați drept parametri, sunt reglați pe valori determinate, invariabile în condițiile date. După identificarea celei mai bune valori a funcției obiectiv în raport cu factorul de influență considerat, se reglează respectivul factor pe nivelul optimal și se continuă experimentarea, atribuind diferite valori unui alt factor ș.a.m.d..

#### 48 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

În acest mod, cercetarea este redusă mereu la experimente unifactoriale, dar atunci când se studiază influența unui număr mare de factori, numărul încercărilor crește excesiv [Cicală, 1999]. Principalele dezavantaje ale experimentului clasic ar fi numărul mare de încercări și, nu în ultimul rând, metodologia extrem de laborioasă. În plus, rezultatele sunt afectate de o manieră semnificativă de nivelele inițiale care sunt atribuite mai mult sau mai puțin arbitrar factorilor de influență, mai ales în situații în care există interacțiuni între aceștia și ele sunt semnificative.

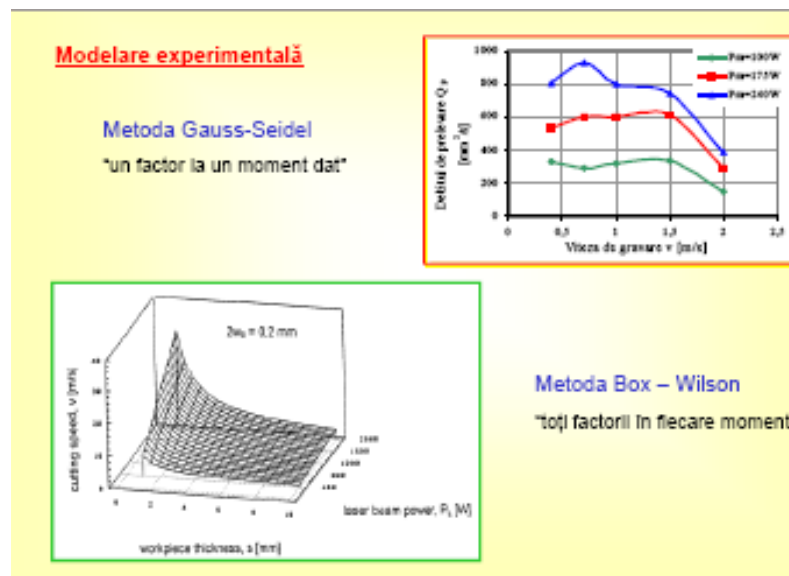


Fig 2.1 Metode de modelare experimentală [Nichici 2004]

A doua metodă, denumită uzual **experimentul factorial** este caracterizată prin faptul că la fiecare nouă încercare se modifică valoarea tuturor factorilor de influență existenți.

În urma prelucrării rezultatelor, se obține un model, adesea de formă polinomială, care, pe de-o parte, permite estimarea valorilor funcției obiectiv și, pe de altă parte, oferă informații privind direcția în care se află domeniul optim al funcției obiectiv studiate.

Avantajele experimentului factorial față de experimentul clasic ar fi multiple, și se vor aminti cele mai importante:

- reducerea numărului de încercări și implicit reducerea costurilor experimentării;
- posibilitatea identificării influenței directe a fiecărui factor de influență asupra funcției obiectiv.

În concluzie, experimentul factorial este caracterizat prin faptul că la fiecare încercare experimentală se modifică valoarea tuturor factorilor de influență, deci influența fiecărui factor asupra valorilor funcției obiectiv este determinată de toate



încercările efectuate. Prin aceasta, volumul experimentării și costurile asociate acesteia se reduc considerabil.

Experimentul factorial, organizat în spațiul multi-factorial al variabilelor unui proces tehnologic, reprezintă elementul principal al metodelor de căutare a optimului funcției/funțiilor obiectiv specifice sistemului investigat [Nichici, 2004]. De regulă (fig. 2.2.), acțiunea de căutare se inițiază cu un experiment factorial de ordinul 1, se continuă cu experimente factoriale de ordin superior și se finalizează cu deplasarea după direcția gradientului funcției obiectiv, până la atingerea optimului.

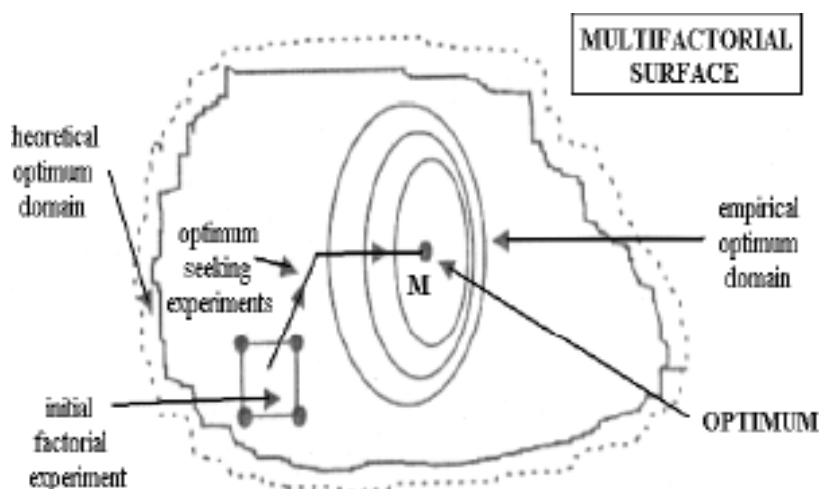


Fig. 2.2 Principiul căutării experimentale a optimului funcțiilor obiectiv [Nichici 1997]

În cazul cercetării doctorale, trecerea de la principiile enunțate anterior la aplicarea nemijlocită a acestora în proiectarea experimentării se concretizează, în lucrarea de față, prin două programe avansate de experimentare, denumite **pilot** și **principal**, care vor beneficia de utilizarea celor două metode de experimentare, **clasică** și **factorială**, prezentate în paginile precedente.

În consecință, din considerente strategice, dar și pragmatice, programul experimental al cercetării doctorale a fost astfel structurat încât:

- să cuprindă două etape succesive, denumite convențional PILOT și PRINCIPAL și
- să permită aplicarea metodelor de experimentare CLASICĂ și FACTORIALĂ

**Experimentul pilot E1F** este un experiment factorial  $2^3$ , care a fost realizat pe o singură grosime de material și a avut ca scop studiul efectelor factorilor care dirijează iradierea în procesul de tăiere laser. Volumul experimentului pilot a cuprins 9 încercări, iar logica acestuia a fost de explorare a domeniului experimental în ceea ce privește evoluția și controlabilitatea procesului de tăiere cu fascicul laser Nd:YAG. Factorii de influență considerați în cadrul acestui experiment au fost **viteza de tăiere**  $v$  [mm/min] și **puterea laser medie**  $P$  [W]. Descrierea pe larg a experimentului pilot, inclusiv matricea program concretă, este prezentată în paragraful 2.3.1.

**Experimentul principal** este un experiment complex, constituit dintr-un experiment factorial **E2F**, realizat pe 2 grosimi de material și dintr-un experiment clasic **E2C**, realizat pe șase grosimi de material. Printr-o proiectare ingenioasă, volumul experimentului principal a cuprins  $11+6 = 17$  încercări.

Factorii de influență considerați în cadrul acestui experiment au fost, după caz, **viteza de tăiere**  $v$  [mm/min], **frecvența pulsurilor**  $f$  [Hz], **puterea laser medie**  $P$  [W] și **defocalizarea suprafeței iradiate**  $\delta$  [mm].

Experimentul principal a lărgit aria de investigație specifică experimentului pilot și a aprofundat, prin aplicarea simultană a metodelor de experimentare clasică și factorială, identificarea și cunoașterea procesului de tăiere cu fascicul laser Nd:YAG a materialului CEFS. Descrierea pe larg a experimentului principal, alături de matricea program concretă este prezentată în paragraful 2.3.2. O vedere de ansamblu a localizării programului experimental complex și a programelor constitutive ale acestuia în spațiul multifactorial supus investigării este oferită de figurile 2.3. și 2.4.

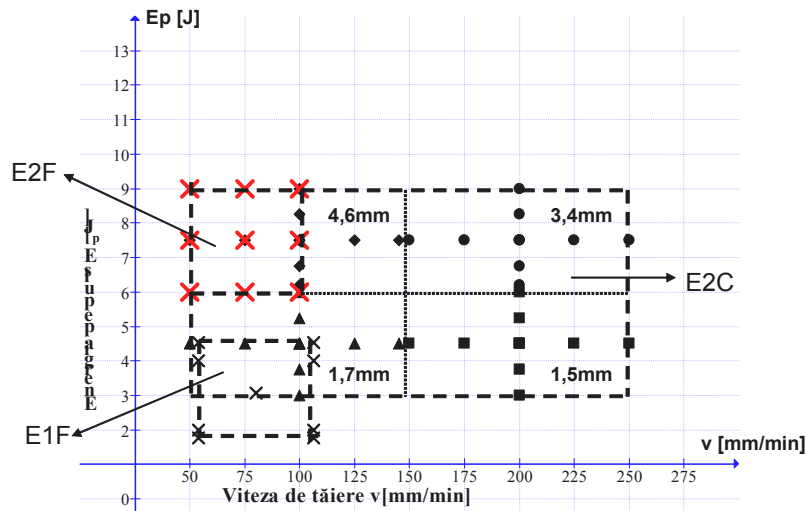


Fig. 2.3 Domeniul experimental pentru experimentul clasic și factorial

În fig. 2.3. și 2.4. reprezentările grafice sunt realizate în coordonate energie/putere laser – viteză de tăiere. Grosimea plăcilor din CEFS intervine ca parametru în experimentarea clasică și ca factor de influență în experimentarea factorială.

Trebuie remarcat că, în condițiile cercetării doctorale, pentru un domeniu de grosimi de material cuprins între 1,5 mm și 4,6 mm, s-au aplicat regimuri de tăiere laser Nd:YAG caracterizate prin intervale de reglare a factorilor de influență, după cum urmează:

- pentru energia pe puls  $E_p$  [J], între 1,76 și 9 J;
- pentru puterea laser medie  $P$  [W], între 44 și 270 W;
- pentru defocalizarea suprafeței iradiate  $\delta$  [mm], între 0 și -2mm;
- pentru viteza de tăiere  $v$  [mm/min], între 54 și 250 mm/min

Asa cum se va vedea în continuare (p.2.3.) în cadrul programului experimental complex urmează a fi realizate un număr de 75 tăieturi, necesare și suficiente pentru modelarea matematică a funcțiilor obiectiv ale tăierii laser Nd:YAG, în condițiile date.

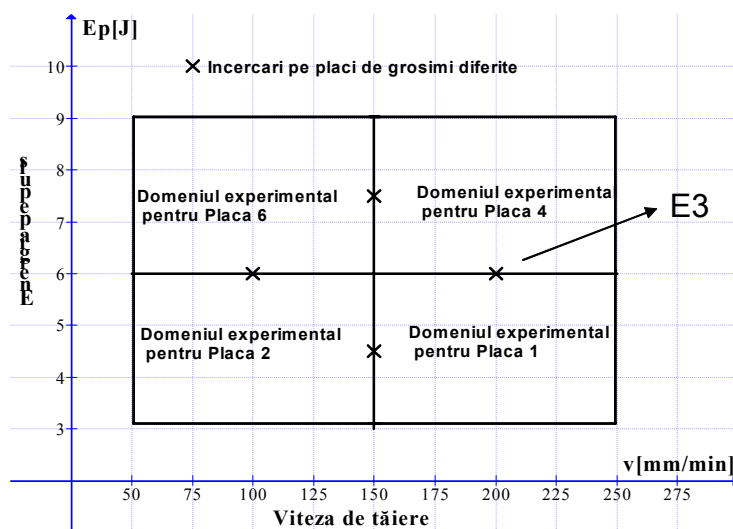


Fig. 2.4 Domeniul experimental pentru experimentul clasic

Trebuie subliniat că proiectarea și prelucrarea datelor programului experimental descris s-au raportat la un proces tehnologic complex, difuz, de natură probabilistică, greu controlabil la nivel fenomenologic. Depășirea dificultăților inerente unei asemenea abordări a fost posibilă prin valorificarea creativă a experienței colectivului de laseri tehnologici din Universitatea noastră și prin aplicarea pe scară largă a resurselor informatice disponibile, în particular a programului STATGRAPHICS.

## 2.2 Condiții fizice ale experimentării

### 2.2.1. Materialul supus tăierii laser

Așa cum s-a amintit și în paragraful anterior, materialul care a fost utilizat în cadrul experimentării este un material Compozit din clasa CEFS, constituit dintr-o matrice polimerică (rășină Epoxidică) și o armătură din Fibră de Sticlă.

Tehnologia de realizare a unor produse sub formă de plăci din materialul CEFS utilizat este reprezentată schematic în fig. 2.5. Aceasta constă în învelirea suprafeței active a unei matrițe cu fibră de sticlă și apoi pulverizarea peste acesta a rășinii poliesterice. Se observă că, în aceste condiții, omogenitatea macroscopică și precizia dimensională a plăcilor fabricate prezintă abateri aleatoare inevitabile, care nu pot totuși influența semnificativ caracteristicile geometrice ale tăieturilor laser realizate în cadrul experimentării [Caiazza, 2005] [Taweel, 2009].

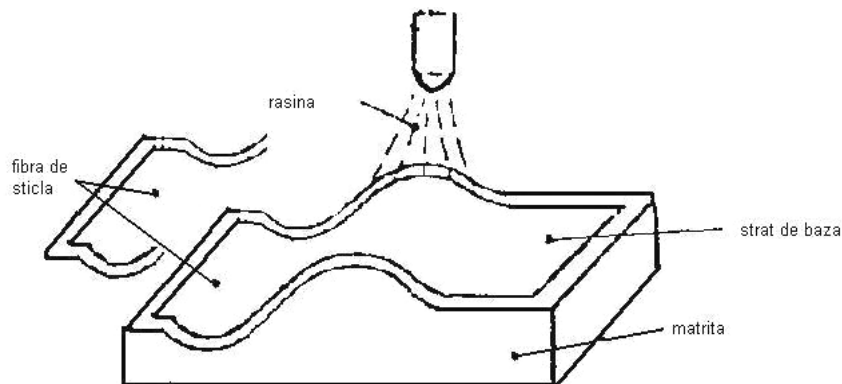


Fig. 2.5 Formarea materialului compozit

Pentru efectuarea cercetării experimentale s-a optat pentru plăci din material compozit rășină epoxidică R601 armată cu fibră de sticlă de tip E, având următoarele dimensiuni caracteristice:

- lungime 150 mm cu excepția plăcii de 4,2 mm care are 200 mm;
- lățime 150 mm, cu excepția plăcii de 4,2 mm care are 100 mm;
- grosime 1,5; 1,7; 2; 3,4; 4,2; 4,6 [mm]

Alegerea acestor dimensiuni a ținut seama de:

- tehnologia de fabricație a materialului compozit și de oferta comercială a producătorului industrial;
- caracteristicile dimensionale ale mesei de lucru și posibilitățile tehnologice ale sistemelor laser folosite în experimentare;
- numărul și dimensiunile minime necesare ale tăieturilor laser realizate din punct de vedere al obiectivelor cercetării experimentale din teza de doctorat.

Materialul compozit (tabelul 2.1) conține fibre de sticlă cu lungimea de până la 5 cm, drepte sau îndoite.

Tabel 2.1. Proprietăți generale ale materialului compozit CEFS [Chang 2006]

Forma nominală	Șuvițe continui de roving
Densitatea [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1.8-2.1
Conductivitatea termică [ $\text{kcal}/\text{h } ^\circ\text{C}$ ]	0.21-0.28
Conținutul de fibre [%]	75
Coeficientul de dilatație termică [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	2-9
Tipul rășinii termorezistente	vinilester
Duritatea (Shore, Hs)	55-60
Rezistența de rupere la tracțiune [ $\text{kg}_f/\text{mm}^2$ ]	45-65
Rezistența de rupere la compresiune [ $\text{kg}_f/\text{mm}^2$ ]	45-60
Modulul de elasticitate longitudinal [ $\text{kg}_f/\text{mm}^2$ ]	2000-4000
Rezistența de rupere la forfecare [ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ]	20

Fibrele sunt de tip „mustăți” având o orientare aleatoare, iar grosimea fibrei de sticlă a fost de 0,1mm pentru plăcile subțiri, respectiv 0,2 mm pentru plăcile groase. Fibrele nu au o anumită orientare în raport cu direcția de tăiere, astfel încât materialul poate fi considerat omogen, din acest punct de vedere. Ponderea procentuală a fibrei de sticlă în conținutul materialului a fost estimată ca fiind de 75%. Rășina din compoziția materialului prelucrat este o rășină epoxidică având structura moleculară reprezentată în fig. 2.6.

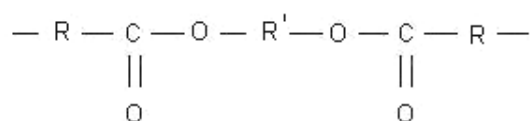


Figura 2.6 Structura chimică a polimerului

Câteva proprietăți fizice și chimice ale rășinilor epoxidice sunt enumerate în continuare [Fișă tehnică]:

- lichid tixotrop cu miros înțepător de stiren
- masa specifică (densitate) 1,05 – 1,15 g / cm<sup>3</sup>
- rezistența la tracțiune 12 – 90 MPa
- modul de elasticitate 3,5 – 4,3 GPa
- punct de fierbere 145 ° C
- punct de topire -30° C
- punct de inflamabilitate 32° C
- limite de inflamabilitate în aer 1,1 - 8% în volum stiren
- presiune de vapori 0,6 KPa la 0° C stiren
- solubilitate în apă 0,03 % la 25° C - neglijabilă
- punct de aprindere 490° C, etc.

Denumirea comercială a rășinii utilizate este rășină epoxidică R 601 [Fișă tehnică]. Produsul este o soluție de rășini epoxidice, în stiren, sub formă de monomer, fiind destinat la fabricarea de obiecte din material polimeric, întărit cu fibră de sticlă. Firma producătoare a acestui produs este LEDA Italia. Denumirea chimică este: stiren, monostiren, vinilbenzen, feniletilena. Produsul conține aditivi.

Lumina, căldura, presiunea și acizii puternici pot provoca debutul unei polimerizări exotermice a stirenului monomer, iar ca o consecință a acestui fapt, pot apărea creșteri de tensiuni interne, distrugerii ale produselor și explozii.

Vaporii de stiren se pot acumula în spații închise sau joase și pot forma amestecuri explozive cu aerul. Materialul este inflamabil, nociv prin inhalare, iritant pentru ochi și piele. În cazul riscului de expunere la concentrații mari de vapori, este necesară folosirea unui aparat aspirator, cu filtru pentru vapori organici tip A. [Fișă tehnică]

Componenta care conferă rezistență materialului CEFS este armătura ceramică a materialului - fibra de sticlă, care este de tip E, fibrele sunt scurte și cu orientare aleatorie. Câteva dintre proprietățile fibrelor de sticlă utilizate sunt indicate în tabelul 2.2., iar compoziția chimică a aceleiași tip de sticlă este indicată în tabelul 2.3.

## 54 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Tabel 2.2. Principalele caracteristici ale sticlei de tip E [Balteș, 2003]

Tipul sticlei	Densitatea [g/cm <sup>3</sup> ]	Temperatura de înmuiere [°C]	Rezistența la rupere [MPa]	Modul de elasticitate [GPa]	Diametrul filamentului [μm]
E	2,52 – 2,55	846	3500 – 3520	73 – 79	10 – 11,25

Tabel 2.3. Compoziția chimică a fibrei de sticlă de tip E [Das, 2009]

Constituent	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>
Cantitatea %	55.2	14.8	7.3	3.3	18.7	0.2	0.2	0.2	0.1

Un rol determinant în comportarea materialului compozit la solicitări exterioare îl are interfața dintre matrice și armătură, care asigură coerența solidarizării dintre acestea și implicit sinergia indicatorilor rezistenței mecanice a materialului, considerat în ansamblu.

### 2.2.2. Echipamentul laser

Încercările experimentale s-au efectuat pe două echipamente tehnologice laser Nd:YAG din aceeași familie constructiv-funcțională, dar de puteri maxime diferite (150, respectiv 400W), prezentate în continuare. Schema bloc a unui echipament tehnologic laser este prezentată în fig. 2.7. Principalele blocuri constructiv- funcționale ale unui asemenea echipament sunt deci: sursa laser; capul de lucru; sistemul de deplasare a obiectului de prelucrat OP.

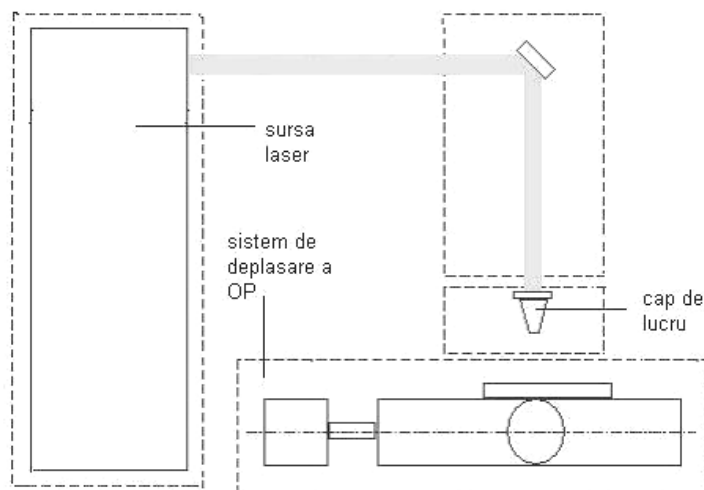


Fig. 2.7. Schema bloc a unui echipament tehnologic laser [Chryssolouris, 1991]

Vederi de ansamblu ale sistemelor de tăiere laser Nd:YAG de înaltă performanță, nemijlocit utilizate în programul experimental al cercetării doctorale, sunt prezentate în fig 2.8. și 2.9.



Fig 2.8 Laser cu Nd :YAG de Tip TRUMPH HL124P,  $P_{\max} = 150W$

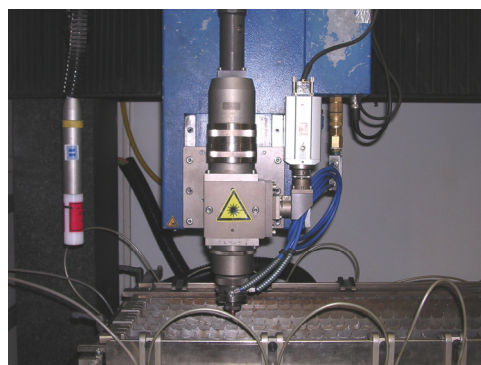


Fig. 2.9 Laser cu Nd :YAG de tip TRUMPH HL304P,  $P_{\max} = 400W$

Principalele caracteristici constructive ale acestor sisteme tehnologice laser sunt reproduse în tabelul 2.4. [Carte tehnică, 124P], [Carte tehnică, 304P].

Stabilirea mărimilor fizice cu rol de factori de influență prin care se controlează regimul de iradiere a suprafeței supuse tăierii laser, în condițiile experimentării date, trebuie să aibă în vedere particularitățile funcționale ale laserilor Nd:YAG, între care lungimea de undă  $\lambda = 1,06 \mu m$ , transmiterea fascicului laser emis prin fibră optică și regimul de funcționare pulsant.

56 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Tabel 2.4. Caracteristicile sistemelor tehnologice laser TRUMPH HL124P și HL 304P [Carte tehnică, 124P], [Carte tehnică, 304P]

Sisteme tehnologice laser			
Laser	Caracteristici	HL 124 P	HL 304 P
	Puterea maximă de ieșire [W]	150	400
	Puterea maximă laser pe piesă [W]	120	330
	Puterea maximă a pulsului [kW]	5	9
	Energia pulsului [J]	0,1 - 50	0,1 - 70
	Durata pulsului [ms]	0,3 - 20	0,3 - 20
	Diametrul fibrei optice [ $\mu\text{m}$ ]	400	400
Alimentare și consumatori	Racordare electrică	50/60 Hz 16 A	50/60 Hz 63 A
	Putere maximă absorbită [Kw]	5,5	18
Montaj	Masa [kg]	380	800
	Dimensiuni LxIxH [mm]	1020	1608
		1460	1550
		650	750
Temperatura ambiantă [ $^{\circ}\text{C}$ ]	10 - 40	10 - 40	

Mărimile ce caracterizează emisia radiației laser Nd:YAG în regim pulsant, pentru o formă dreptunghiulară a pulsului laser, sunt prezentate în fig. 2.10.

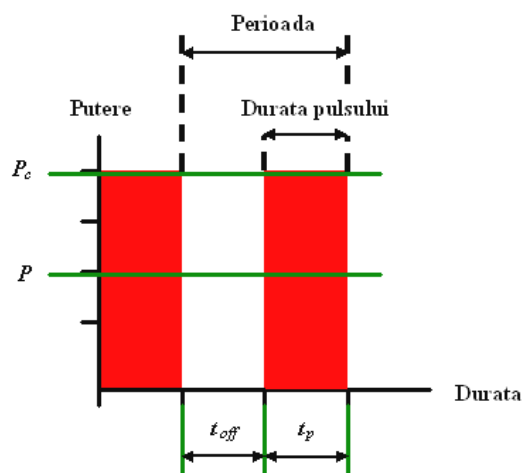


Fig. 2.10 – Mărimile regimului pulsant

**Perioada  $t_c$  [s]**, reprezintă durata unui ciclu complet de repetare a pulsurilor, compusă din durata pulsului și durata pauzei dintre pulsurile succesive. Perioada se calculează ca fiind inversul frecvenței de pulsare.



$$t_c = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad (2.1)$$

**Durata pulsului  $t_p$  [s]**, reprezintă timpul în care are loc emisia radiației laser. În funcție de ciclu și de frecvență durata pulsului este dată de relația următoare:

$$t_p = \frac{\eta}{f} \text{ [s]} \quad (2.2.)$$

**Durata pauzei între pulsuri  $t_{off}$  [s]**, reprezintă timpul în care oscilatorul laser nu emite radiație. În *relația 2.2* intervine coeficientul  $\eta$  de umplere a pulsurilor laser, care poate fi calculat cu relația :

$$\eta = \frac{t_p}{t_p + t_{off}} = t_p \cdot f \text{ [%]} \quad (2.3)$$

unde:

$$t_p + t_{off} = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad (2.4)$$

În cazul echipamentelor tehnologice utilizate în cadrul programului experimental, se reglează direct (ciclu) perioada de repetiție a pulsurilor, durata pulsului fiind o mărime derivată. Pe alte sisteme tehnologice laser, durata pulsurilor se reglează direct. Cunoașterea acestor două mărimi  $t_c$  și respectiv  $t_p$  face ca regimul folosit în încercările respective să fie comparabil cu alte regimuri de iradiere.

**Puterea medie  $P$  [W]** reprezintă puterea emisă de oscilatorul laser într-un timp îndelungat în situația în care emisia este continuă.

Se consideră că puterea emisă în timpul pulsului este uniform repartizată pe timpul iradierii, aceasta este puterea de vârf .

**Puterea de vârf  $P_p$  [W]**, reprezintă valoarea de amplitudine a puterii fascicului laser, emisă pe durata pulsului. Puterea de vârf se calculează pe baza relației sale cu puterea medie

$$P_p = \frac{P}{\eta} \text{ [W]} \quad (2.5)$$

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

$$E_p = P_p \cdot t_p = \frac{P}{f} \text{ [J]} \quad (2.6)$$

În cazul experimentelor realizate s-a reglat direct puterea medie și frecvența de pulsare, energia pe puls fiind determinată de acestea. Cunoașterea pentru regimul de iradiere pulsant a valorii pentru ciclu și a frecvenței de pulsare permite calcularea unor mărimi.

Înțelegerea modului în care poate fi dirijată iradierea în regim pulsant, la nivelul sistemului tehnologic laser, este un prim pas în asigurarea controlabilității procesului de interacțiune laser – substanță, în condițiile specifice tăierii laser Nd:YAG.

### 2.2.3. Controlul condițiilor de iradiere la tăierea laser

În condiții date, definirea condițiilor de iradiere laser la nivel macroscopic, valabilă deci atât pentru iradierea în regim pulsant cât și pentru iradierea în regim continuu, se realizează cu ajutorul următoarelor mărimi:

- **Diametrul D al fasciculului laser în pată focală**
- **Intensitatea fasciculului laser I [W/cm<sup>2</sup>]:**

$$I = \frac{E_p}{t_p \cdot \left(\pi \frac{D^2}{4}\right)} = \frac{P_p}{\pi \frac{D^2}{4}} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (2.7)$$

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

- **Energia liniară E<sub>l</sub> [J/cm]**, care reprezintă raportul între puterea laser medie și viteza de tăiere:

$$E_l = \frac{P}{v} \text{ [J /mm]} \quad (2.8)$$

- **Viteza de tăiere v [mm/min]**

Toți acești factori au un efect cumulat asupra condițiilor în care materialul este iradiat. În urma modificării acestor factori, un punct de pe suprafața materialului, asociat ipotetic cu centrul petei focale a fasciculului laser este iradiat o anumită durată și primește o anumită energie. Iradierea cu fascicul laser folosind un regim pulsant, în condițiile tăierii laser, 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 câteva 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, a **modelul iradierii în regim continuu**. Astfel, un punct de pe suprafața materialului va fi iradiat pe durata de interacțiune:

$$t_{ic} = \frac{D}{v} \text{ [s]} \quad (2.9)$$

unde:

- $D$  - diametrul fasciculului laser;
- $v$  - viteza de tăiere.

Timpul  $t_i$  [s] va fi numit **durata de interacțiune relativă la sistemul cinematic**. El reprezintă durata maximă cât poate fi iradiat un punct de pe suprafața materialului și este independent de durata pulsului, ciclu și frecvență, mărimi care caracterizează regimul pulsat.

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 pulsat și durata de interacțiune se introduce raportul între timpul de interacțiune și perioada  $r$ .

$$r = \frac{t_{ic}}{t_c} \text{ [-]} \quad (2.10)$$

Raportul  $r$  arată câte perioade de pulsare sunt cuprinse în timpul în care un punct de pe suprafața materialului se află în zona de iradiere dată de pata fasciculului laser pe suprafața piesei. Partea întreagă a raportului  $r$  (excepție valoarea 0) arată numărul de pulsuri consecutive care iradiază un punct de pe suprafața piesei. Partea fracționară a raportului  $r$  nu are o interpretare exactă deoarece fracțiile de perioadă nu pot fi asociate cu deschiderea iradierii în timpul pulsului la fel pentru toate punctele de pe suprafața piesei.

Se poate spune însă că, mărirea raportului  $r$  (partea întreagă și partea fracționară) arată intensificarea iradierii materialului prin creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material și prin participarea de mai multe puncte de pe suprafața materialului la iradiere. Iradierea cu folosirea de pulsuri consecutive în același punct pe suprafața piesei are efect asupra fenomenelor termice care apar în material. Astfel se remarcă importanța raportului  $r$  în caracterizarea condițiilor în care are loc iradierea.

În continuare, 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:

$$d = v \cdot t_c = \frac{v}{f} \quad (2.11)$$

Distanța „ $d$ ” reprezintă deplasarea spotului laser (fig. 2.11.). 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 dependentă

de diferența între diametrul spotului și distanța dată de deplasarea fascicului laser 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.

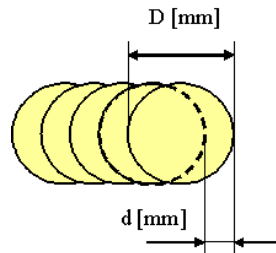


Fig. 2.11. – Mărimile care caracterizează suprapunerea spotului fascicului laser pe suprafața piesei. *D* – diametrul spotului; *d* – deplasarea spotului

**Raportul *spo* (spot overlap)**, reprezintă raportul între diferența dintre diametrul spotului și distanța „*d*” parcursă de acesta pe durata unei perioade și diametrul fascicului laser. (fig. 2.11)

$$spo = \frac{D - d}{D} \quad (2.12)$$

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

$$1 - spo = \frac{v}{D \cdot f} \quad (2.13.)$$

Raportul „*spo*” are valori mai mici decât 1. Valoarea 1 înseamnă că nu există deplasare, spoturile succesive se suprapun. Valoarea 0 înseamnă că spoturile succesive se distribuie unul lângă altul. Valorile negative înseamnă că spoturile succesive acționează separat și la distanță pe suprafața piesei. Distanța dintre spoturi este cu atât 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 tabelele din paragrafele 2.3.1 și 2.3.2.

Factorii de influență care caracterizează iradierea modifiacăți în cadrul programelor experimentale, la care se adaugă diametrul spotului laser, pot fi grupați astfel încât să se utilizeze doar două mărimi independente:

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

Pentru procesele de prelucrare, inclusiv tăiere cu laser un factor de influență important îl reprezintă distanța dintre planul focal al fascicului laser și suprafața piesei. Acest factor se numește **defocalizare**.

Valorile pentru **defocalizare** se consideră **pozitive** dacă planul focal se află **deasupra piesei** de prelucrat, **valoarea 0** dacă planul focal se află la **suprafața piesei** și **negative** dacă planul focal se află **sub suprafața piesei**. Intensitatea fascicului laser este maximă în planul focal. Atât valorile pozitive cât și valorile negative ale defocalizării scad intensitatea fascicului laser la suprafața piesei. Diferența constă în propagarea divergentă respectiv convergentă a fascicului laser în zona de interacțiune cu materialul. În ambele cazuri pata fascicului laser pe suprafața piesei este mai mare decât pata focală. Intensitatea fascicului laser la suprafața piesei este maximă atunci când fasciculul laser este focalizat la suprafața piesei.

Pentru tăierea laser noțiunea de intensitate a fascicului la suprafața piesei are o importanță scăzută deoarece iradierea se realizează direct la frontul de eroziune, tot frontul de eroziune fiind iradiat. Pentru tăiere se folosește focalizarea la suprafață și focalizarea în interiorul piesei.

Aceste situații sunt prezentate în fig. 2.12, respectiv 2.13. Defocalizarea va da poziția zonei iradiate cu intensitate maximă în raport cu suprafața piesei. Influența defocalizării este dată și de profunzimea de focalizare (distanța pe care este menținut concentrat fasciculul laser). Pentru piesele subțiri se preferă focalizarea fascicului laser la suprafața piesei, iar pentru piesele groase se preferă focalizarea fascicului în interiorul piesei.

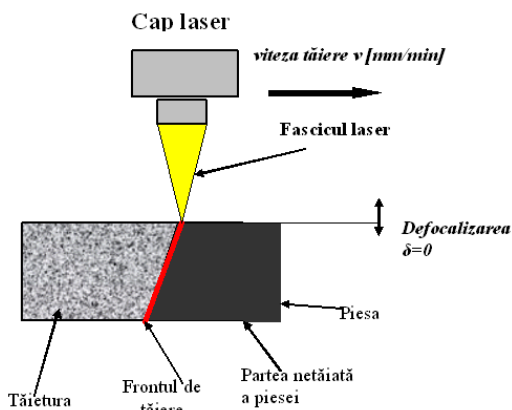


Fig. 2.12 Focalizarea fascicului laser la suprafața piesei

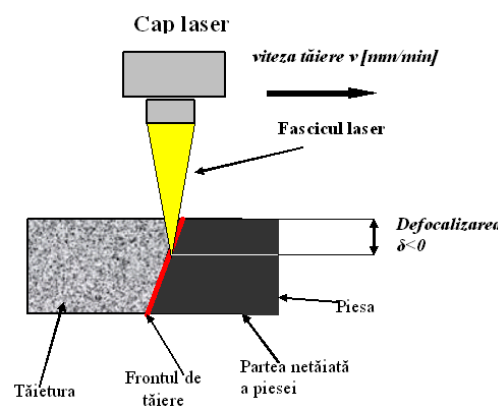


Fig. 2.13 Focalizare fascicului laser în interiorul piesei

Schema de principiu a realizării procesului de tăiere laser Nd:YAG, în condițiile programului experimental al cercetării doctorale, este prezentată în fig 2.14, în care factorii de influență variați în experimente sunt marcați cu caractere italice.

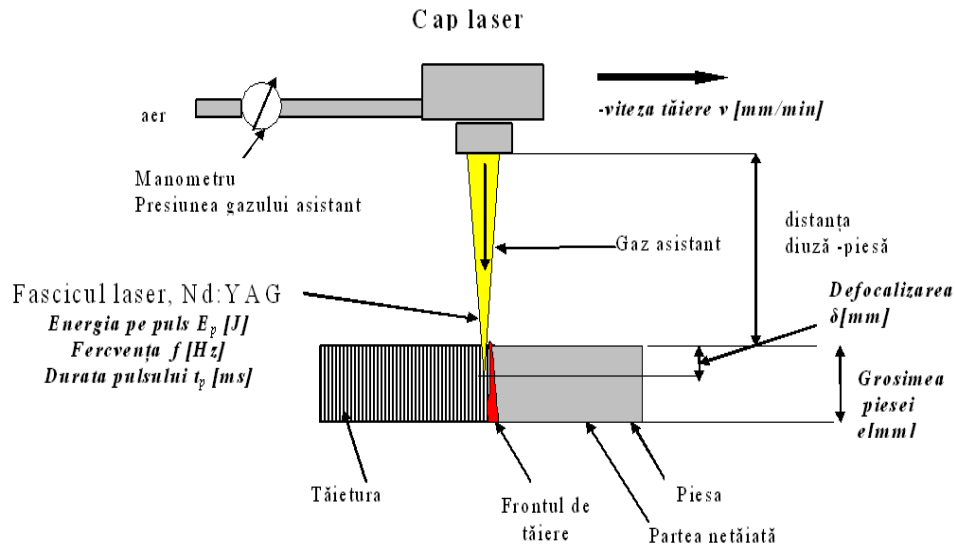


Fig. 2.14 Schemă a desfășurării procesului de tăiere cu mărimile variate în experiment

Tăieturile efectuate în plăci din materialul CEFS cu grosimea sub 5 mm au fost rectilinii și au fost realizate fără desprinderea completă a pieselor. În câteva cazuri particulare, focarul fascicului laser a fost deplasat în interiorul plăcii supuse tăierii.

## 2.3 Programe de experimentare

### 2.3.1 Experimentul E1F

Experimentul 1 (numit și experimentul Pilot) a avut ca scop studiul efectelor factorilor care controlează iradierea asupra procesului de tăiere cu fascicul laser. Experimentul a fost realizat la ISIM Timișoara în laboratorul de laseri industriali.

Se urmărește obținerea unui model experimental, iar în urma analizelor primare efectuate asupra procesului, s-a optat pentru modelarea prin experiment factorial complet de ordinul I, EFC 2<sup>3</sup>. Volumul experimental a fost unul redus, fiind realizate 9 încercări necesare pentru realizarea unui plan experimental factorial notat cu E1F. Cei trei factori de influență sunt:

- viteza de tăiere  $v$  [mm/min];
- frecvența pulsului  $f$  [Hz];
- puterea medie a fascicului laser  $P$  [W].

#### 2.3.1.1. Proiectarea experimentului și realizarea măsurătorilor

Pe baza informației apriorice din literatura de specialitate [Cicală,1999] au fost stabilite coordonatele punctului central al experimentului și intervalele de variație ale celor 3 factori de influență, rezultând valorile nivelelor superior și inferior pentru fiecare factor de influență. Valorile numerice rezultate sunt indicate în tabelul 2.5.

Tabel 2.5 Nivele ale factorilor de influență

Factor influență	de	Valori codate	Valori fizice		
			v [mm/min]	f [Hz]	P [W]
Punct central		0	80,1	23,5	72
Interval de variație		$\Delta_j$	26,1	1,5	28
Nivel inferior		-1	54	22	44
Nivel superior		+1	106,2	25	100

Încercările au fost realizate pe o instalație laser cu Nd:YAG de tip HL 124P, condițiile experimentale generale fiind:

- placă de material compozit CEFS (material compozit constituit dintr-o matrice polimerică - rășină epoxidică și o armătură - fibra de sticlă, legate coerent) cu grosimea de 2 mm;
- iradierea folosind fascicul laser Nd:YAG cu lungimea de undă  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ;
- iradiere în regim pulsant, timpul pulsului de 0.8 ms;
- iradierea folosind optica fixă, fig. 2.15;
- diametrul fasciculului laser în pata focală a fost de 0.2 mm.
- focalizarea fasciculului laser a fost realizată la suprafața piesei  $\delta = 0$ .

Tăieturile realizate au fost liniare, efectuate de la marginea plăcii către interiorul acesteia, iar piesele nu au fost separate complet.

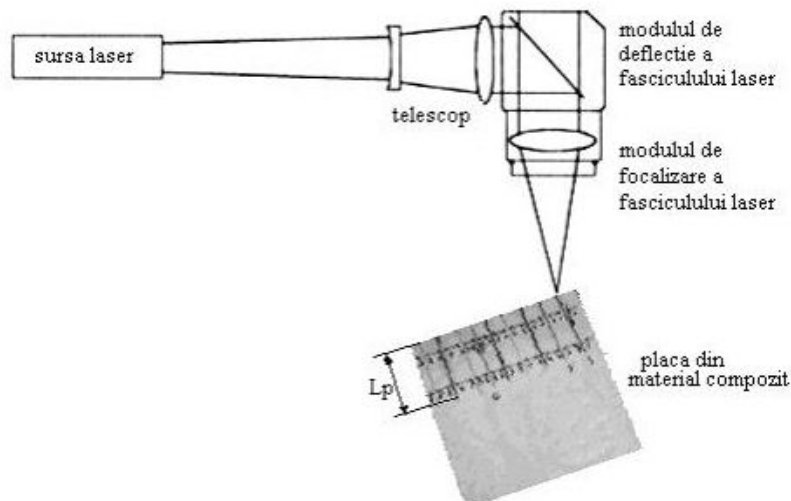


Fig. 2.15 Principiul de focalizare în cazul sistemului optic fix

#### 64 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Cei trei factori variați în experiment caracterizează condițiile de iradiere ale materialului. Puterea medie reglează intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei iar viteza și frecvența de pulsare reglează timpul de interacțiune între radiația laser și material. Pentru putere și viteza de tăiere s-a ales ca valoarea nivelului superior apropiată de dublul valorii nivelului inferior. Pentru variația frecvenței de tăiere s-au utilizat nivele relativ apropiate deoarece modificarea frecvenței produce modificări importante pentru procesul de tăiere pe ansamblul său.

Metoda de analiză întrebuintată presupune ca toți trei factori de influență să fie exprimați în „aceleași unități de măsură”. Aceasta înseamnă transformarea valorilor din sistemul real în sistemul codificat. S-a întrebuintat un sistem codificat în care valoarea maximă a fost considerată pentru fiecare factor de influență +1 iar valoarea minimă -1.

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  $x$  (mic) valorile codificate (adimensionale) și cu  $X$  (mare) valorile reale avem următoarea relație de transformare.

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2.14)$$

$$\text{In toate cazurile studiate } x_{\min} = -1 \text{ și } x_{\max} = +1 \quad (2.15)$$

$$A = -1 + \frac{v - 54}{106.2 - 54} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{v - 54}{52.2} \cdot 2 = 0.0383 v - 3.0689 [-] \quad (2.16)$$

$$B = -1 + \frac{f - 22}{25 - 22} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{f - 22}{3} \cdot 2 = 0.666 f - 15.666 [-] \quad (2.17)$$

$$C = -1 + \frac{P - 44}{100 - 44} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{P - 44}{56} \cdot 2 = 0.0357 P - 1.5714 [-] \quad (2.18)$$

O sinteză a relațiilor de transformare între cele două sisteme de valori pentru factorii de influență este prezentată în *tabelul 2.6*.

Tabel 2.6: Funcțiile de transformare între valorile reale ale factorilor de influență și cele din sistemul codificat pentru experimentul E1F

Mărimea	Funcția directă	Funcția inversă
Viteza	$A = 0.0383 v - 3.0689 [-]$	$v = 26.1 A + 80.1 [\text{mm/min}]$
Frecvența	$B = 0.666 f - 15.666 [-]$	$f = 1.5 B + 23.5 [\text{Hz}]$
Puterea	$C = 0.0357 P - 1.5714 [-]$	$P = 28 C + 72 [\text{W}]$



Structura urmată a fost cea corespunzătoare unui experiment factorial complet EFC  $2^3$ , cu o încercare în punctul central. Celor 3 factori de influență, viteza, frecvența și puterea le-au fost atribuite câte două nivele de variație pentru explorarea spațiului multifactorial. Dimensiunile acestui spațiu au fost stabilite pe baza experienței existente în tăierea materialelor polimerice cu fibră de sticlă.

Valorile fizice și codificate alocate celor 3 factori în cadrul experimentului sunt sintetizate în tabelul 2.6, amplasarea punctelor experimentale care reprezintă încercările apare în fig 2.16, iar structura matricii programului experimental în tabelul 2.8. Legătura dintre valorile fizice și cele codificate ale unei funcții obiectiv este realizată cu relația:

$$x_{\text{icod}} = x_{\text{icod}} = \frac{x_{\text{ifiz}} - x_{\text{ifiz0}}}{I} \quad (2.19)$$

în care:  $x_{\text{icod}}$  = valoarea codificată a factorilor de influență

$x_{\text{ifiz}}$  = valoarea fizică a factorilor de influență

$x_{\text{ifiz0}}$  = valoarea fizică în punctul central

$I$  = intervalul de variație al factorilor [Cicală,1999]

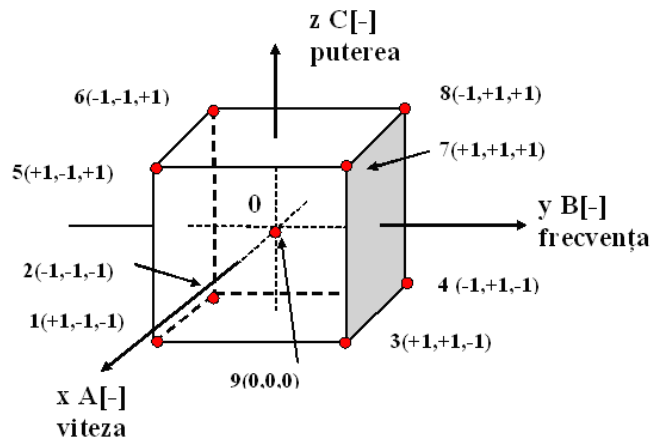


Figura 2.16 Dispunerea punctelor experimentale în spațiul multifactorial pentru planul experimental factorial E1F

Pentru încercările realizate la experimentul E1F valorile factorilor care caracterizează iradierea sunt prezentate în tabelul 2.7. În tabelul 2.7 se remarcă valorile intensității fasciculului laser de ordinul  $10^7 \text{W/cm}^2$ . Valorile pozitive ale raportului **spo** arată că materialul este iradiat în fiecare punct. Raportul spo are valori ridicate, peste 0.5.

Pentru o situație în care efectul iradierii asupra materialului este asociat cu pata focală a fasciculului laser, cum este tăierea laser prin descompunerea materialului, creșterea raportului spo înseamnă creșterea penetrării medii a tăieturii produsă în material. Se observă că fiecare punct de pe suprafața materialului este iradiat de mai multe pulsuri consecutive (între 2 și 5). Astfel timpul real de interacțiune între radiația laser și material este mai mare decât timpul pulsului.

Tabel 2.7 Valorile factorilor ce caracterizează iradierea pentru E1F

Factori de influență					Mărimi dependente de factorii de influență							
Încercarea	Viteza $v$ [mm/min]	Frecvența $f$ [Hz]	Putere $P$ [W]	Ciclu $\eta$ [%]	Perioada $t_c$ [ms]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7$ W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul $s_{po}$ [-]	Țimpul $t_{ic}$ [mm]	Raportul $r$ [-]
<b>1</b>	106.2	22	44	1.76	45.4	2500	2	24.8	0.79	0.59	112	2.48
<b>2</b>	54	22	44	1.76	45.4	2500	2	48.8	0.79	0.79	222	4.88
<b>3</b>	106.2	25	44	2	40	2200	1.76	24.8	0.7	0.64	112	2.82
<b>4</b>	54	25	44	2	40	2200	1.76	48.8	0.7	0.82	222	5.55
<b>5</b>	106.2	22	100	1.76	45.4	5681	4.54	56.4	1.8	0.59	112	2.48
<b>6</b>	54	22	100	1.76	45.4	5681	4.54	111.1	1.8	0.79	222	4.88
<b>7</b>	106.2	25	100	2	40	5000	4	56.4	1.59	0.64	112	2.82
<b>8</b>	54	25	100	2	40	5000	4	111.1	1.59	0.82	222	5.55
<b>9</b>	80.1	23.5	72	1.88	42.5	3829	3.06	53.9	1.21	0.71	149	3.52

O sinteză asupra condițiilor experimentale este prezentată în *tabelul 2.8* Pentru determinarea erorii experimentale asociată funcțiilor de răspuns, pe lângă cele 8 încercări, s-a efectuat o încercare în punctul de coordonate ( $v = 80,1$  mm/min;  $f=23,5$  Hz;  $P = 72$  W), considerat punctul central al experimentului factorial.

Tabel 2.8 Planul experimental pentru experimentul factorial E1F

Încercarea	Viteza		Frecvența		Putere	
	v [mm/min]	A [-]	f [Hz]	B [-]	P [W]	C[-]
1	106,2	+1	22	-1	44	-1
2	54	-1	22	-1	44	-1
3	106,2	+1	25	+1	44	-1
4	54	-1	25	+1	44	-1
5	106,2	+1	22	-1	100	+1
6	54	-1	22	-1	100	+1
7	106,2	+1	25	+1	100	+1
8	54	-1	25	+1	100	+1
9	80,1	0	23,5	0	72	0

### 2.3.2 Experimentul E2

În continuare în acest paragraf se va prezenta Experimentul 2 (E2F, E2C), care prezintă o cercetare extinsă a procesului de tăiere laser a materialului CEFS. Experimentele au fost realizate în Laboratorul Lasers et materiaux Le Creusot de la Universite de Bourgogne, Franța.

La realizarea experimentelor s-a utilizat sistemul tehnologic laser Nd:YAG de tip HL 304P. Cercetarea experimentală a urmărit efectele puterii, vitezei de tăiere și a grosimii materialului. Pentru E2 au fost utilizate următoarele condiții experimentale generale:

- iradiere cu laser Nd:YAG, lungimea de undă  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$  ;
- transmiterea radiației laser s-a realizat prin fibră optică cu diametrul mediu de 400  $\mu\text{m}$ ;
- spotul laser are forma circulară, cu diametrul 200  $\mu\text{m}$  în pata focală;
- gazul asistent utilizat a fost aer la presiunea din rezervor de 5 bar;
- distanța focală a lentilei de focalizare a fost de 100 mm, lentila din sticlă;
- distanța de la duza de suflare a gazului și piesă a fost de 2,5 mm, gazul asistent a fost suflat către piesă coaxial cu fasciculul laser;
- focalizarea radiației a fost realizată la suprafața piesei pentru plăcile considerate subțiri,  $\delta=0$  (plăcile cu grosimile de 1,5 mm, 1,7 mm, 2 mm) și în interiorul piesei  $\delta = -2$  mm pentru plăcile considerate groase (plăcile cu grosimile de 3,4 mm, 4,2 mm, 4,6 mm);
- iradierea a fost realizată în regim pulsant folosind frecvența  $f = 30$  Hz și durata pulsului  $t_p=1,5$  ms.

## 68 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Planul experimental realizat constă din serii experimentale clasice pentru variația puterii și a vitezei de tăiere. S-a fixat frecvența de pulsare și timpul unui puls. Prin variația energiei pe puls s-a realizat variația puterii medii. Pe fiecare placă s-au realizat două replici pentru aceleași condiții experimentale. Factorii de influență variați au fost următorii :

- **Viteza de tăiere  $v$  [mm/min];**
- **Energia pe puls  $E_p$ [J].** (Prin aceasta s-a variat **puterea medie  $P$ [W]**, aceasta fiind considerată factor de influență);
- **Grosimea plăcii  $e$ [mm].** Au fost utilizate 6 plăci de grosimi diferite: plăci subțiri (1,5 mm, 1,7 mm, 2 mm) respectiv plăci groase (3,4 mm, 4,2 mm, 4,6 mm).

Organizarea experimentelor a considerat două tipuri de serii experimentale cu 5 puncte experimentale și serii experimentale cu 3 puncte. S-au considerat două nivele de variație pentru viteza de tăiere și pentru putere, fiecare având 3 sau 5 valori. Nivelele vor fi desemnate cu denumirile de „nivel redus” și respectiv „nivel ridicat”. În tabelele 2.9 - 2.14 sunt prezentate seriile experimentale și mărimile care caracterizează iradierea pentru cele 6 plăci. Pentru toate plăcile iradiate s-au reglat următorii factori de influență: frecvența  $f = 30$  Hz, durata pulsului  $t_p = 1.5$  ms; diametrul fascicului laser în pata focală  $d_{foc} = 200$   $\mu$ m. Pe baza acestora s-au calculat următorii factori: **perioada  $t_c = 33.3$  ms**, respectiv **ciclul  $\eta = 4.5$  %**.

Tabel 2.9 Condiții experimentale pentru Placa 1 ( $e = 1.5$  mm,  $f = 30$  Hz,  $t_p = 1.5$  ms,  $\delta = 0$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7$ W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo [-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul $t_c$ [ms]	Nr.pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S1.1 Variația cu puterea medie</b>									
1.5N1	200	6	<b>180</b>	54	1.27	0.44	4000	60	1.8
1.5N2	200	5.25	<b>157.5</b>	46.8	1.11	0.44	3500	60	1.8
1.5N3	200	4.5	<b>135</b>	40.2	0.95	0.44	3000	60	1.8
1.5N4	200	3.75	<b>112.5</b>	33.6	0.79	0.44	2500	60	1.8
1.5N5	200	3	<b>90</b>	27	0.63	0.44	2000	60	1.8
<b>S 1.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
1.5N6	<b>150</b>	4.5	135	54	0.95	0.58	3000	80	2.4
1.5N7	<b>175</b>	4.5	135	46.2	0.95	0.51	3000	68	2.05
1.5N8	<b>200</b>	4.5	135	40.2	0.95	0.44	3000	60	1.8
1.5N9	<b>225</b>	4.5	135	36	0.95	0.37	3000	53	1.6
1.5N10	<b>250</b>	4.5	135	32.4	0.95	0.3	3000	48	1.44
<b>Replici</b>									
1.5N11	<b>200</b>	4.5	135	40.2	0.95	0.44	3000	60	1.8

Tabel 2.10 Condiții experimentale pentru Placa 2 ( $e = 1.7 \text{ mm}$ ,  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 1.5 \text{ ms}$ ,  $\delta = 0$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7 \text{ W/cm}^2$ ]	Raportul spo [-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul $t_{ic}$ [ms]	Nr. pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S 2.1 Variația cu puterea medie</b>									
1.7N1	100	6	<b>180</b>	108	1.27	0.72	4000	120	3.6
1.7N2	100	5.25	<b>157.5</b>	94.2	1.11	0.72	3500	120	3.6
1.7N3	100	4.5	<b>135</b>	81	0.95	0.72	3000	120	3.6
1.7N4	100	3.75	<b>112.5</b>	67.2	0.79	0.72	2500	120	3.6
1.7N5	100	3	<b>90</b>	54	0.63	0.72	2000	120	3.6
<b>S 2.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
1.7N6	<b>50</b>	4.5	135	162	0.95	0.86	3000	240	7.2
1.7N7	<b>75</b>	4.5	135	108	0.95	0.79	3000	160	4.8
1.7N8	<b>100</b>	4.5	135	81	0.95	0.72	3000	120	3.6
1.7N9	<b>125</b>	4.5	135	64.8	0.95	0.65	3000	96	2.88
1.7N10	<b>150</b>	4.5	135	54	0.95	0.58	3000	80	2.4
<b>Replici</b>									
1.7N11	<b>100</b>	4.5	135	81	0.95	0.72	3000	120	3.6

Tabel 2.11 Condiții experimentale pentru Placa 3 ( $e = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 1.5 \text{ ms}$ ,  $\delta = 0$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7 \text{ W/cm}^2$ ]	Raportul spo [-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul $t_{ic}$ [ms]	Nr. pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S 3.1 Variația cu viteza de tăiere</b>									
2N1	50	9	270	324	1.91	0.86	6000	240	7.2
2N2	75	9	270	216	1.91	0.79	6000	160	4.8
2N3	100	9	270	162	1.91	0.72	6000	120	3.6
<b>S 3.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
2N4	100	7.5	225	135	1.59	0.72	5000	120	3.6
2N5	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8
2N6	50	7.5	225	270	1.59	0.86	5000	240	7.2
<b>S 3.3 Variația cu viteza de tăiere</b>									
2N7	50	6	180	216	1.27	0.86	4000	240	7.2
2N8	75	6	180	144	1.27	0.79	4000	160	4.8

70 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7$ W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo [-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul $t_{ic}$ [ms]	Nr. pulsuri csecutive $r$ [-]
2N9	100	6	180	108	1.27	0.72	4000	120	3.6
<b>Replici</b>									
2N10	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8
2N11	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8

Tabel 2.12 Condiții experimentale pentru Placa 4 ( $e = 3.4 \text{ mm}$ ,  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 1.5 \text{ ms}$ ,  $\delta = -2 \text{ mm}$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [ $10^7$ W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo [-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul $t_{ic}$ [ms]	Numar -pulsuri csecutive $r$ [-]
<b>S 4.1 Variația cu puterea medie</b>									
3.4N1	200	9	270	81	1.91	0.44	6000	60	1.8
3.4N2	200	8.25	247.5	73.8	1.75	0.44	5500	60	1.8
3.4N3	200	7.5	225	67.2	1.59	0.44	5000	60	1.8
3.4N4	200	6.75	202.5	60.6	1.43	0.44	4500	60	1.8
3.4N5	200	6	180	54	1.27	0.44	4000	60	1.8
<b>S 4.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
3.4N6	150	7.5	225	90	1.59	0.58	5000	80	2.4
3.4N7	175	7.5	225	76.8	1.59	0.51	5000	68	2.05
3.4N8	200	7.5	225	67.2	1.59	0.44	5000	60	1.8
3.4N9	225	7.5	225	60	1.59	0.37	5000	53	1.6
3.4N10	250	7.5	225	54	1.59	0.3	5000	48	1.44
<b>Replici</b>									
3.4N11	200	7.5	225	67.2	1.59	0.44	5000	60	1.8

Tabel 2.13 Condiții experimentale pentru Placa 5 ( $e = 4.2\text{ mm}$ ,  $f = 30\text{ Hz}$ ,  $t_p = 1.5\text{ ms}$ ,  $\delta = -2\text{ mm}$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [107W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo[-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul tic[ms]	Nr.pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S 5.1 Variația cu viteza de tăiere</b>									
4.2N1	50	9	270	324	1.91	0.86	6000	240	7.2
4.2N2	75	9	270	216	1.91	0.79	6000	160	4.8
4.2N3	100	9	270	162	1.91	0.72	6000	120	3.6
<b>S 5.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
4.2N4	100	7.5	225	135	1.59	0.72	5000	120	3.6
4.2N5	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8
4.2N6	50	7.5	225	270	1.59	0.86	5000	240	7.2
<b>S 5.3 Variația cu viteza de tăiere</b>									
4.2N7	50	6	180	216	1.27	0.86	4000	240	7.2
4.2N8	75	6	180	144	1.27	0.79	4000	160	4.8
4.2N9	100	6	180	108	1.27	0.72	4000	120	3.6
<b>Replici</b>									
4.2N10	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8
4.2N11	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8

Tabel 2.14 Condiții experimentale pentru Placa 6 ( $e = 4.6\text{ mm}$ ,  $f = 30\text{ Hz}$ ,  $t_p = 1.5\text{ ms}$ ,  $\delta = -2\text{ mm}$ )

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [107W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo[-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul tic[ms]	Nr.pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S 6.1 Variația cu puterea medie</b>									
4.6N1	100	9	270	162	1.91	0.72	6000	120	3.6
4.6N2	100	8.25	247.5	148.2	1.75	0.72	5500	120	3.6
4.6N3	100	7.5	225	135	1.59	0.72	5000	120	3.6
4.6N4	100	6.75	202.5	121.2	1.43	0.72	4500	120	3.6
4.6N5	100	6	180	64.8	1.27	0.72	4000	120	3.6

72 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Energia pe puls $E_p$ [J]	Puterea medie $P$ [W]	Energia liniară $E_l$ [J/mm]	Intensitatea $I$ [107W/cm <sup>2</sup> ]	Raportul spo[-]	Puterea de vârf $P_p$ [W]	Timpul tic[ms]	Nr.pulsuri consecutive $r$ [-]
<b>S 6.2 Variația cu viteza de tăiere</b>									
4.6N6	50	7.5	225	270	1.59	0.86	5000	240	7.2
4.6N7	75	7.5	225	180	1.59	0.79	5000	160	4.8
4.6N8	100	7.5	225	135	1.59	0.72	5000	120	3.6
4.6N9	125	7.5	225	64.8	1.59	0.65	5000	96	2.88
4.6N10	150	7.5	225	90	1.59	0.58	5000	80	2.4
<b>Replicii</b>									
4.6N11	100	7.5	225	135	1.59	0.72	5000	120	3.6

În *tabelul 2.15* sunt prezentate nivelele de variație pentru putere și viteza de tăiere.

Tabel 2.15. Nivele ale puterii și vitezei de tăiere pentru seriile experimentale clasice.

Nr.crt	Mărimea variata	Domeniul de variație	Puncte experimentale	Interval de variație	Asocierea	Caracterizarea
1	Puterea $P$ [W]	90-180	5	22.5	Placa 1, Placa2	Nivel scăzut al puterii
2	Puterea $P$ [W]	180-270	5	22.5	Placa 4, Placa6	Nivel ridicat al puterii
3	Puterea $P$ [W]	180-270	3	45	Placa 2, Placa5	Nivel ridicat al puterii
4	Viteza $v$ [mm/min]	150-200	5	25	Placa 1, Placa 4	Nivel ridicat al vitezei
5	Viteza $v$ [mm/min]	50-150	5	25	Placa 2, Placa 6	Nivel scăzut al vitezei
6	Viteza $v$ [mm/min]	50-100	3	25	Placa 2, Placa 5	Nivel scăzut al vitezei

Grosimea plăcii  $e$  [mm] a fost asociată cu nivelele puterii și ale vitezei de tăiere. Astfel, nivelul scăzut al puterii a fost asociat cu plăcile subțiri, iar nivelul ridicat al puterii cu plăcile groase, alături de coborîrea planului focal în interiorul piesei pentru



plăcile groase. Astfel, la suprafața piesei s-a menținut o valoare ridicată a intensității fascicului laser.

Nivelul ridicat al vitezei de tăiere a fost asociat cu placa mai subțire, iar nivelul scăzut cu placa mai groasă. Această asociere a fost repetată pentru cele două poziții ale planului focal (sau altfel spus cu plăcile considerate groase respectiv subțiri). Pentru seriile cu trei puncte experimentale s-a realizat o asociere între nivelul scăzut al vitezei de tăiere, respectiv nivelul ridicat al puterii. Aceasta a fost realizată pe o placă subțire (placa 3) și repetată pentru o placă groasă (placa 5), cu coborârea planului focal în interiorul piesei.

Experimentul E2F a considerat alte condiții experimentale față de experimentul E1F. Principalele deosebiri sunt date de dublarea timpului pulsului și considerarea unei valori mai mari pentru frecvența de pulsare (dar relativ apropiată de aceasta). Nivelul intensității fascicului laser în pata focală a rămas la  $10^7$  [W/cm<sup>2</sup>].

Valorile raportului **spo** au fost pozitive pentru toate tăieturile realizate, astfel iradierea materialului a fost completă. Se remarcă existența unor valori sub 0.5 ale raportului **spo** asociate cu viteze de tăiere mari. Există iradiere a unui punct de pe suprafața materialului, folosind pulsuri consecutive. Astfel, în planul experimental se întâlnesc situații pentru care la iradiere participă între 1 și 7 pulsuri. Prin aceasta se produc diferențe mari în ceea ce privește timpul real de interacțiune între radiația laser și material.

Planul experimental al experimentului principal a fost valorificat prin analiza directă a variațiilor funcțiilor obiectiv după seriile experimentale clasice, analiză prezentată în Capitolul 4. Încercările de la experimentul principal sunt suficient de multe pentru a fi selectate planuri experimentale factoriale.

S-au selectat din încercările realizate un plan experimental factorial notat cu E2F. Acesta este un plan experimental factorial complet de tip  $2^3$ . Pentru aceasta s-au utilizat plăcile 3 și 5. Factorii de influență variați în cadrul experimentului factorial au fost:

- viteza de tăiere  $v$ [mm/min];
- puterea medie a fascicului laser  $P$  [W];
- grosimea materialului  $e$ [mm].

S-au realizat trei încercări în punctul central pentru a realiza studiul statistic. Analiza rezultatelor experimentale cu programul Statgraphics a cerut transformarea valorilor factorilor variați într-un sistem codificat. Scopul analizei datelor a fost corelarea condițiilor de iradiere date de putere și viteza de tăiere, cu grosimea materialului. În tabelul 2.16 sunt prezentate valorile factorilor pentru sistemul real și pentru sistemul codificat. În tabelul 2.17 se prezintă o sinteză asupra organizării planului experimental factorial E2F.

Se obțin următoarele relații de transformare reale și cele de calcul, analog ca pentru experimentul E1

$$D = -1 + \frac{v-50}{100-50} \cdot (1-(-1)) = -1 + \frac{v-50}{50} \cdot 2 = 0.04v - 3 [-] \quad (2.20)$$

#### 74 Obiective, strategii, programe și metode de cercetare experimentală

$$E = -1 + \frac{P-180}{270-180} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{P-180}{90} \cdot 2 = 0.0222P - 5 [-] \quad (2.21)$$

$$F = -1 + \frac{e-2}{4.2-2} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{e-2}{2.2} \cdot 2 = 0.909e - 2.818 [-] \quad (2.22)$$

Relațiile anterior obținute sunt prezentate în tabelul 2.18.

Tabel 2.16 Valori ale factorilor de influență pentru experimentul factorial E2F

Încercarea	Viteza		Puterea		Grosimea	
	v[mm/min]	D [-]	P [W]	E[-]	e[mm]	F[-]
1.(2N7)	50	-1	180	-1	2	-1
2.(2N9)	100	+1	180	-1	2	-1
3.(2N1)	50	-1	270	+1	2	-1
4.(2N3)	100	+1	270	+1	2	-1
5.(4.2N7)	50	-1	180	-1	4,2	+1
6.(4.2N9)	100	+1	180	-1	4,2	+1
7.(4.2N1)	50	-1	270	+1	4,2	+1
8.(4.2N3)	100	+1	270	+1	4,2	+1
9.(2N5)	75	0	225	0	2	-1
10.(2.N10)	75	0	225	0	2	-1
11.(2.N11)	75	0	225	0	2	-1

Tabelul 2.17 Nivele ale factorilor de influență pentru experimentul factorial E2F

Factor de influență	Valori codate	Valori fizice		
		v [mm/min]	P [W]	e [mm]
Punct central	0	75	225	3,1
Interval de variație	$\Delta_j$	25	45	1,1
Nivel inferior	-1	50	180	2
Nivel superior	+1	100	270	4,2

Tabel 2.18. Funcțiile de transformare între valorile reale ale factorilor de influență și cele din sistemul codificat

Mărimea	Funcția directă	Funcția inversă
Viteza	$D = 0.04v - 3 [-]$	$v = 25D + 75$ [mm/min]
Puterea	$E = 0.0222P - 5 [-]$	$P = 45E + 225$ [W]
Grosimea	$F = 0.909e - 2.818 [-]$	$e = 1.1F + 3.1$ [mm]

Fig. 2.17 prezintă o schemă a dispunerii nivelelor pentru planul experimental factorial E2F

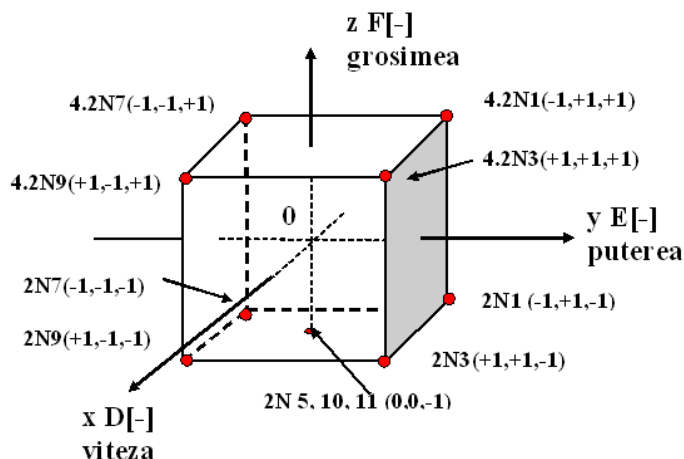


Fig 2.17 Domeniul de cercetare experimentală, pentru planul experimental factorial E2F

În cele prezentate anterior au fost enumerate valorile factorilor de influență utilizați în experimente. Este important ca mărimile prezentate să fie asociate după anumite criterii de clasificare. Astfel se consideră următoarele clasificări:

- a) după contribuția factorilor la proces
  - factorii care controlează iradierea cu fascicul laser (ex. puterea medie, viteza de tăiere, durata pulsului)
  - factorii care controlează alte aspecte ale procesului de tăiere (ex. grosimea materialului, presiunea gazului asistent).
- b) după generalitatea factorilor care caracterizează iradierea:
  - factori generali - puterea medie, viteza de tăiere
  - factori specifici regimului pulsant - energia pe puls, raportul spo

## 2.4 Metode și mijloace de măsurare a dimensiunilor tăieturilor

Pentru tăieturile realizate în ambele experimente a fost măsurată lățimea tăieturilor în trei puncte ale tăieturii, debutul D, partea de mijloc M și partea finală F. Tăieturile au fost liniare, cele trei valori măsurate au fost mediate pentru a obține lățimea tăieturii. Măsurătorile au fost realizate la partea superioară și, respectiv, la partea inferioară a tăieturii.

La realizarea măsurătorilor au fost utilizate două sisteme tehnologice:

- microscopul de laborator de tip Carl Zeiss Jena (fig. 2.20).
- microscopul optic.

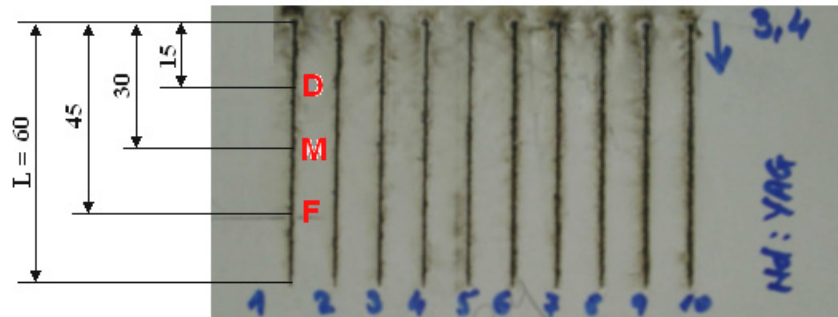


Fig. 2.18 Dispunerea pe placă a tăieturilor și a punctelor de măsurare

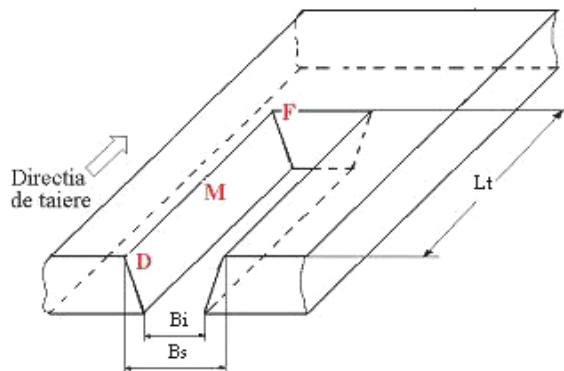


Fig. 2.19 Secțiunea tăieturii

Măsurările au fost realizate pe un microscop de laborator de tip Carl Zeiss Jena (fig 2.20) care se compune dintr-un batiu solid, prevăzut cu trei șuruburi de calare pentru aducerea în poziție orizontală. Pe batiu este montată masa de măsurare care cuprinde sania longitudinală, sania transversală și masa rotitoare. Cele două sănii ale mesei se deplasează prin acționarea a două șuruburi micrometrice solidare cu doi tamburi gradați având dimensiuni de 0,01 mm. Cursa de măsurare a șuruburilor micrometrice este de 25 mm [David, 2010]. Masa rotitoare are în partea centrală o placă de sticlă transparentă și se rotește la 360°. Piesa se așează fie pe masă (fig 2.20 b), fie între vârful dispozitivului de centrare.

Măsurarea se face prin așezarea plăcii pe masa microscopului (fig. 2.20 b) și citirea prin intermediul ocularului CO a dimensiunilor pentru fiecare tăietură, atât la partea superioară, cât și la partea inferioară a plăcii.

**Microscopul optic** (fig. 2.21) are ca și elemente caracteristice capul ocular CO și rozeta microscopului RM. Este un microscop care intră în categoria aparatelor optice cu poziționare mecanică a pieselor măsurate. Aceste aparate nu au organe de contact capabile să deformeze suprafețele piesei măsurate, în schimb piesele sunt luminate puternic de o lampă, care nu se poate considera izvor de lumină punctual, conturul lor este însoțit de penumbră și de aici pot apărea mici erori de măsurare. [David, 2010].

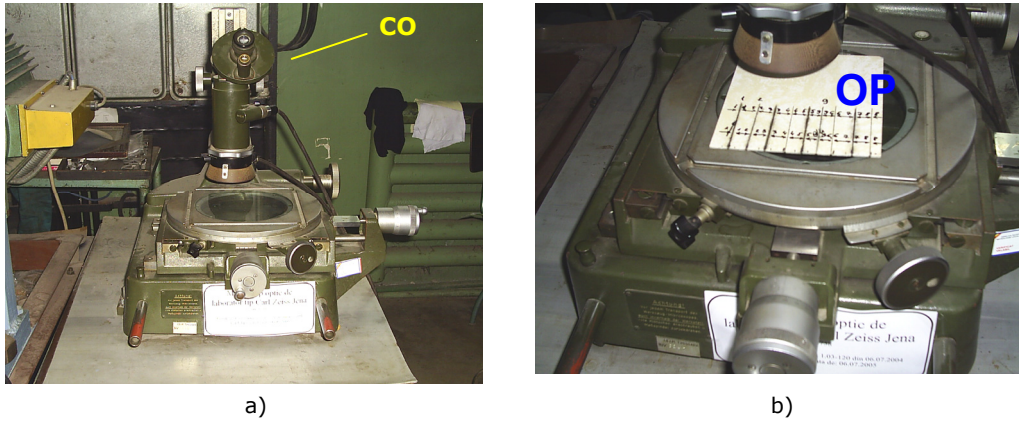


Figura 2.20 Microscopul optic de laborator  
a) Vedere de ansamblu b) Masa de măsurare și obiectul prelucrat

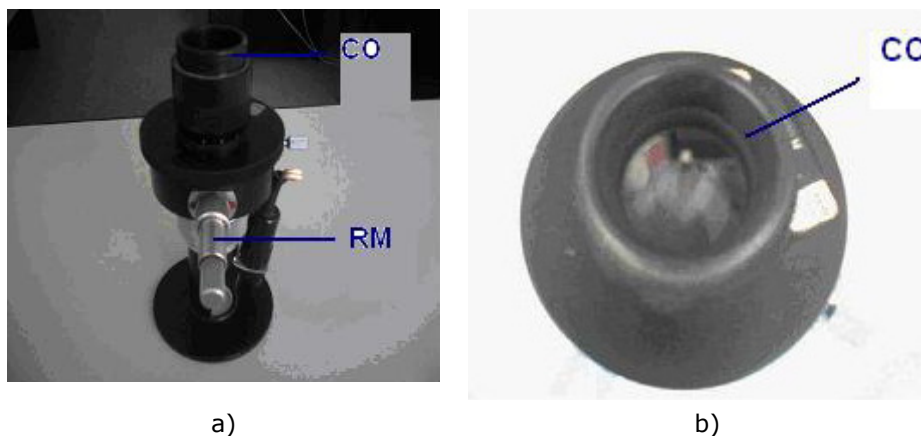


Fig. 2.21. Microscopul optic de laborator a) Vedere de ansamblu b) Ocularul microscopului

Pentru utilizarea microscopului optic se procedează în felul următor:

- se așează placa de material compozit (epruveta) în microscop, așezarea făcându-se astfel încât elementele de măsurat (muchiiile) să poată fi aduse în axa microscopului;
- se urmărește obținerea în ocular suprapunerea centrului firelor reticulare (linii echidistante) cu imaginea muchiei din stânga a tăieturii de măsurat și aducerea scării gradate de la rozeta microscopului (RM) pe muchia din dreapta a tăieturii;
- se citesc dimensiunile prin intermediul ocularului CO (fig. 2.21b)
- se repetă operațiunea pentru fiecare tăietură, atât la partea superioară, cât și la partea inferioară a plăcilor, în cele 3 puncte distincte de: debut D la 15 mm, mijloc M la 30 mm și final F la 45 mm.

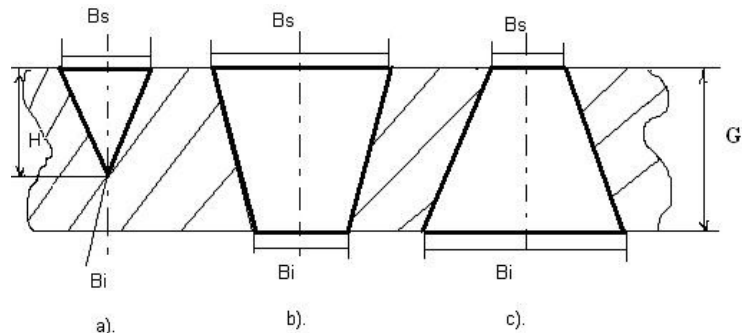


Fig. 2.22 Schema secțiunii unei tăieturi (a) – nepătrunsă (b) – pătrunsă, având lățimea maximă la partea superioară a plăcii (c) – pătrunsă, având lățimea maximă la partea inferioară a plăcii

Trebuie precizat că la tăieturile în care nu a existat pătrundere în punctele de debut, mijloc și final, măsurarea s-a făcut în cel mai apropiat punct în care a existat pătrundere. Rezultatele directe ale măsurătorilor asupra lățimii tăieturii au fost: lățimea tăieturii la partea superioară  $B_s$  [mm] și lățimea tăieturii la partea inferioară  $B_i$  [mm]. S-a realizat o clasificare a tăieturilor după forma secțiunii transversale prin tăietură. S-a considerat o formă ideală pentru aceasta. Astfel, pentru tăieturile nepenetrante s-a considerat o formă triunghiulară, iar pentru tăieturile complet penetrate s-a considerat o formă de trapez, fig. 2.22. S-a făcut distincție între tăieturile mai late la partea superioară și cele mai late la partea inferioară. S-a calculat lățimea medie a tăieturii  $B_m$  [mm].

Pentru tăieturile care nu au fost penetrate complet, sau au prezentat zone nepenetrante, s-a măsurat adâncimea tăieturii. Măsurătorile s-au realizat prin introducerea în tăietură a tije centrale a unui șubler. Tija a avut grosimea de 0.1 mm și pentru a determina profunzimea tăieturii  $h$  [mm] s-au realizat trei măsurători exact în cele trei puncte în care s-a determinat lățimea tăieturii.

Ca investigații suplimentare pentru unele din tăieturile realizate piesele au fost complet despărțite și s-au realizat fotografiile ale suprafețelor interioare ale tăieturilor.

## 2.5. Concluzii parțiale

În Capitolul 2 se prezintă programele experimentale realizate, o atenție deosebită acordându-se caracterizării avansate a materialului supus prelucrării și sistemelor tehnologice laser Nd:YAG utilizate. Sunt prezentate metodele și mijloacele de măsurare a elementelor geometrice ale tăieturilor realizate, principal purtător de informație asupra eficienței tăierii laser.

Se formulează obiectivele specifice ale cercetării experimentale. Se analizează caracteristicile materialului compozit prelucrat și caracteristicile sistemelor tehnologice laser utilizate în experimente. S-au realizat două experimente de tăiere laser pe plăci de material compozit CEFS.

Experimentul 1 a avut un caracter explorator în care s-au variat factorii care controlează iradierea, puterea medie, viteza de tăiere și frecvența de pulsare. Experimentul a constat dintr-un plan experimental de tip factorial  $2^3$ , iar încercările au fost realizate pe o placă cu grosimea de 2 mm.

Experimentul 2 a fost un experiment extins în care s-au folosit mai multe plăci de grosimi diferite, a constat dintr-un experiment factorial E2F și un experiment clasic E2C. S-a variat puterea medie și viteza de tăiere. Planul experimental a constat din serii experimentale clasice cu 3 și 5 puncte experimentale, iradierea s-a realizat în regim pulsant.

Se prezintă măsurile care caracterizează regimul de iradiere pulsant. Acestea se determină pe baza valorilor factorilor de influență variați, însă arată mult mai bine efectul iradierii asupra materialului.

Tăieturile au fost realizate fără separarea pieselor, iar cu ajutorul unui microscop optic au fost măsurate lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară, acest microscop optic fiind utilizat și la studiul metalelor. Pentru tăieturile nepenetrante s-a măsurat profunzimea tăieturii. S-au realizat fotografii ale suprafețelor interioare ale tăieturilor.

### 3. FEZABILITATEA ȘI STABILITATEA PROCESELOR DE TĂIERE TERMICĂ CU LASER

#### 3.1 Efecte termice ale iradierii cu fascicul laser a materialelor

La iradierea cu fascicul laser a materialelor industriale, în condițiile analizate în prezenta lucrare, se produc fenomene de absorbție parțială a energiei radiației și de conversie a energiei absorbite în căldură. Macroscopic, se poate considera că interacțiunea laser-substanță are ca efect dezvoltarea în materialul iradiat a unei surse termice, caracterizată prin densitatea de flux termic  $q$  [W/cm<sup>2</sup>].

Atunci când absorbția radiației are loc la suprafața materialului, între intensitatea fasciculului laser  $I$  [W/cm<sup>2</sup>] și densitatea de flux termic  $q$  a sursei termice există o proporționalitate dată de coeficientul de absorbție  $A$  [-] [Boboescu, 2010]:

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

Atunci când absorbția radiației laser se produce în profunzimea materialului iradiat, considerat semitransparent, atenuarea intensității fasciculului poate fi estimată cu relația:

$$I(z) = I_0 e^{-\beta z} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

unde:

$I_0$  - intensitatea fasciculului laser la suprafața materialului;

$z$  - coordonata în profunzimea materialului și în direcția de propagare a fasciculului laser;

$\beta$  - coeficientul de atenuare/extincție a radiației în material.

Pentru energia depusă în interiorul materialului poate fi deci utilizată relația [Rykalin, 1978]:

$$|\Delta E(z)| = E_0 \beta e^{-\beta z} \Delta z \quad (3.3)$$

unde  $E_0$  [J] - energia la suprafața piesei

Cea mai mare parte a energiei dată de radiația laser este depusă în material pe adâncime de  $1/\beta$  de la suprafața materialului. [Charschan, 1993]. Există două tipuri de fenomene termice care apar la iradierea cu fascicul laser a materialului:

- încălzirea progresivă a materialului;
- acumularea căldurii în material.



Încălzirea progresivă în material este prezentată în fig. 3.1. Aceasta poate fi descrisă cu ajutorul ecuației căldurii. Acumularea căldurii în materialul iradiat este legată de inițierea și dezvoltarea în interiorul acestuia a unor transformări de fază și/sau de structură. Un fenomen similar se produce și în cazul descompunerii chimice sau fracturării termo-mecanice a materialului supus prelucrării laser.

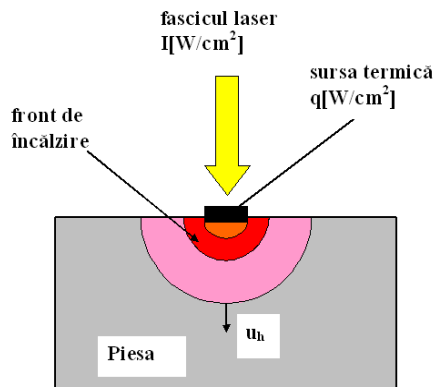


Fig. 3.1 Propagarea frontului de încălzire în material

**Pentru încălzirea progresivă** în material se scrie ecuația căldurii în cele două cazuri – sursa termică la suprafața materialului, respectiv sursa termică volumică.

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:

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

unde:

$$a = \frac{k}{\rho c} - \text{difuzivitatea termică a materialului}$$

Sursa termică este introdusă prin condiția la limită :

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \quad (3.5)$$

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:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \frac{j_q}{k} \left[ \frac{K}{cm^2} \right] \quad (3.6)$$

unde :

$j_q$  - densitatea volumică de flux de căldură [ $W/cm^3$ ];

$a$  - difuzivitatea termică [ $cm^2/s$ ];

$k$  - conductivitatea termică [ $W/(cm \cdot K)$ ].

În ambele cazuri anterior amintite pentru tăierea realizată cu fasciculul laser se impune considerarea mișcării relative a fasciculului laser în direcția axei Ox. Pentru această situație o formă a ecuației căldurii este dată de relația următoare (conductivitatea termică nu variază cu temperatura) :

$$\frac{1}{a} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \left[ \frac{K}{cm^2} \right] \quad (3.7)$$

Ecuația căldurii se formulează pentru o tratare unidimensională, considerând încălzirea materialului în direcția propagării fasciculului laser (axa Oz). Sursa termică dată de fasciculul laser se definește prin considerarea densității de flux termic  $q$  la suprafața materialului.

Rezolvarea acestei ecuații conduce la dependența între temperatura de suprafață, densitatea de flux termic și durata de interacțiune dată de relația:

$$T(0,t) \cong \frac{2q}{k} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad [K] \quad (3.8)$$

În aplicarea condiției la limită a 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 sursei termice prin condiția la limită se poate scrie sub următoarea formă:

$$q = \frac{0,885 T k}{(at)^{\frac{1}{2}}} \quad [W/m^2] \quad (3.9)$$

Din această relație se deduce expresia pentru durata de interacțiune :

$$t = \frac{0,79 T^2 k^2}{q^2 a} \quad [s] \quad (3.10)$$

Cu ajutorul relațiilor dezvoltate mai sus, poate fi pusă problema determinării profunzimii materialului în care sursa termică dezvoltată de iradierea laser poate induce un efect termic semnificativ pentru materialul iradiat. Această profunzime se numește frecvent distanță de penetrare termică. Pentru aceasta, se va considera raportul între variația temperaturii în interiorul materialului și cea la suprafața

materialului folosind relațiile vitezei de propagare a transformării de fază (3.13) și relația sursei termice (3.9) Acest raport arată cât de puternică este încălzirea materialului la o anumită profunzime  $z$  după un anumit timp  $t$ .

Raportul arată variația relativă a temperaturii și pentru o valoare arbitrară a sa, se obține o relație de tipul  $z = z(t)$  care va da profunzimea de penetrare în funcție de timp:

$$\frac{T(z,t) - T_i}{T(0,t)} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \quad [-] \quad (3.11)$$

Acest raport va fi evaluat pentru diferite valori ale profunzimii în tabelul 3.1.

Tabel 3.1 Diferite valori ale distanței de penetrare termică

$z$	$\sqrt{\frac{at}{2}}$	$\sqrt{at}$	$2\sqrt{at}$
$\frac{T(z,t) - T_i}{T(0,t)}$	0.15	0.1	0.02

În cele mai multe cazuri se consideră pentru penetrarea termică în material valoarea  $\sqrt{at}$ , care înseamnă o scădere de 10 ori a temperaturii în profunzimea materialului în raport cu temperatura la suprafața piesei. Valoarea pentru distanța de penetrare termică  $2\sqrt{at}$  înseamnă anularea completă a efectului sursei termice în material. Prin cele prezentate anterior se arată că sursa termică indusă de iradierea laser la suprafața materialului are efect numai pe o anumită profunzime în material.

În continuare, se consideră viteza medie de propagare a frontului de încălzire în profunzimea materialului  $u_h$ , dată de următoarea relație [Ready, 1997]:

$$u_h = \frac{z}{t} = \sqrt{\frac{a}{t}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.12)$$

unde:  $z$  – coordonata de penetrare în profunzimea materialului [m]

$t$  – timpul [s]

Gama transformărilor de fază care pot fi induse în materialele industriale prin acțiuni tehnologice dedicate este extrem de largă. Există transformări (de exemplu, vaporizarea-condensarea, topirea-solidificarea, sublimarea-desublimarea, transformările polimorfe) care se produc la o anumită temperatură, cu absorbție sau cedare de căldură numită căldură latentă, dar și transformări (de exemplu, mutații de ordine-deordine în cristale), care au loc într-un interval de temperaturi, în care absorbția sau degajarea de căldură au loc odată cu creșterea sau scăderea temperaturii.

#### 84 Fezabilitatea proceselor de tăiere termică cu laser

Așa cum se arată în fig. 3.2. transformarea de fază este un proces ce se propagă din aproape în aproape, la limita de separație dintre faza veche și faza nouă.

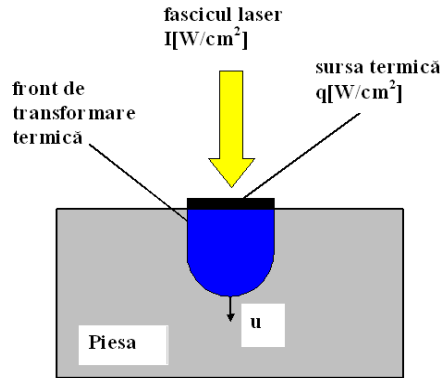


Fig. 3.2 Propagarea frontului de transformare termică în material

În cazul unei transformări susținute prin iradiere laser, în condiții de simetrie cilindrică, corelația între densitatea de flux termic la suprafața materialului  $q$  și viteza de propagare a transformării de fază în material  $u$  este dată de relația [Boboescu, 2010]:

$$q = \rho L u \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (3.13)$$

unde  $L$  reprezintă căldura latentă asociată cu transformarea de fază respectivă.

Relația ignoră satisfacerea condițiilor de realizare a unei transformări de fază date. În consecință, este necesară atingerea temperaturii la care are loc transformarea de fază, în condiții care limitează viteza de propagare a frontului de transformare de fază în material la valoarea vitezei de încălzire a materialului. Propagarea unei transformări de fază în material cu viteză maximă este condiționată de satisfacerea ecuației:

$$q = \rho L \sqrt{\frac{a}{t}} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (3.14)$$

Pentru un proces de prelucrare cu fascicul laser apar ca transformări de fază de primă importanță topirea și vaporizarea materialului iradiat. Trebuie însă remarcat că și procese de transformare extrem de complexe, induse prin iradiere laser, cum ar fi ruperea în stare solidă a materialelor fragile și descompunerea chimică a materialelor organice, pot fi tratate într-un mod similar transformărilor de fază descrise anterior.

## 3.2 Condiții pentru penetrarea laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică

### 3.2.1. Condiții generale

Inițierea proceselor de tăiere laser a plăcilor de material compozit CEFS pune ca primă condiție asigurarea penetrării termice locale a materialului sub acțiunea iradierii cu fascicul laser. În situația analizată, prelevarea materialului excedentar din zona de tăiere se realizează, în principal, prin descompunerea termo-chimică a materialului. În acest context, pot fi identificate următoarele aspecte ale problemelor termice care apar la iradierea cu fascicul laser Nd:YAG a materialului compozit.

**Absorbția radiației laser.** Radiația laser este absorbită de către matricea polimerică la primul contact. Fibra de sticlă este transparentă la radiația emisă de laserul Nd:YAG. Ca rezultat final absorbția are loc atât în material cât și în produșii de descompunere a acestuia. Se poate spune că absorbția radiației are loc în interiorul materialului și nu la suprafața acestuia. Este dificilă caracterizarea absorbției print-un coeficient de absorbție unic deoarece:

- la absorbție participă materiale diferite, matricea polimerică, produșii de ardere a rășinii și de descompunere a fibrei de sticlă aflați la temperaturi diferite;
- intensitatea fasciculului laser în zona de interacțiune este variabilă în limite foarte largi. Se vor putea deci considera variații între 100% și 1% ale coeficientului de absorbție.

Experimentele au arătat că este nevoie de efectul mai multor pulsuri succesive pentru a realiza penetrarea materialului.

**Arderea matricii polimerice.** Arderea rășinii epoxidice este primul efect al radiației laser care se obține odată cu atingerea temperaturii de 490° la suprafața piesei. Arderea rășinii va da procesului de tăiere un caracter exoterm, căldura de reacție obținută se va adăuga celei furnizate direct de fasciculul laser. Se explică astfel nivelul mai scăzut al energiei/puterii folosite pentru tăiere, comparativ cu valorile specifice tăierii laser a materiale metalice și altor materiale ceramice. Oxigenul din aerul folosit ca și gaz asistent va întreține reacția de ardere a materialului.

**Fracturarea fibrei de sticlă.** Fracturarea termică a fibrei de sticlă are loc datorită diferenței de temperatură dezvoltate în material și tensiunilor termice induse de aceasta. Fracturarea localizată a fibrei de sticlă condiționează și controlează eroziunea masică a materialului supus tăierii laser și implicit fezabilitatea procesului de tăiere, considerat în ansamblu. Existența acestui fenomen facilitează obținerea descompunerii materialului și posibilitatea de a realiza tăierea.

**Înmuierea fibrei de sticlă.** Pierderea rigidității fibrei de sticlă are loc la 846 °C (sau între 800°C -860 °C). Acest fenomen termic este important deoarece pierderea rigidității fibrei de sticlă duce la imposibilitatea ruperii acesteia în stare solidă.

**Topirea fibrei de sticlă și încălzirea materialului polimeric prin fibra de sticlă.** Aceste două fenomene fizice au un rol secundar în obținerea penetrării materialului. Topirea fibrei de sticlă se obține pe suprafața interioară a tăieturii. Pentru aceasta este necesară o energie mai mare decât cea pentru ruperea fibrei de sticlă. Conducția căldurii prin fibra de sticlă favorizează producerea unor condiții favorabile arderii matricii polimerice în jurul fibrei de sticlă. Prin aceasta se obțin capete ale fibrei de sticlă la suprafața materialului care vor da un aspect neregulat suprafeței interioare a tăieturii.

În cele ce urmează se va încerca o estimare a nivelului densității de flux termic în materialul iradiat pentru care pot fi declanșate diferite fenomene termice importante pentru procesul tăierii laser a materialelor investigate. În realizarea acestei estimări, durata de interacțiune între radiația laser și material a fost considerată egală cu durata pulsurilor folosite în programul experimental de 0.8 ms și respectiv 1.5 ms, constantele de material au fost considerate după lucrările [\*\*\* 1-6].

Așa cum s-a arătat în cap.2, la caracterizarea condițiilor experimentale, durata reală de interacțiune fascicul laser-material este mai mare, însă în estimarea propusă se va avea în vedere exclusiv aspectul elementar al prezenței unui fenomen fizic dat la iradierea laser a materialului. Rezultă că nu vor fi luate în considerare starea materialului înainte de a fi iradiat (efectul de preîncălzire dat de pulsurile anterioare) și nici efectul de răcire care intervine între pulsuri consecutive.

### 3.2.2. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară obținerii temperaturii de ardere a matricii polimerice

Se consideră că la suprafața materialului fasciculul laser produce o sursă termică cu o densitate de flux termic constantă  $q$  [ $W/cm^2$ ]. Are loc o încălzire progresivă în matricea polimerică fără a se produce transformări de fază în material. Evoluția temperaturii la suprafața materialului este dată de relația:

$$q = \frac{0.885 k_e T}{\sqrt{a_e t}} \quad [W/cm^2] \quad (3.15)$$

unde:

$k_e$  - conductivitatea termică a rășinii epoxidrice,  $k_e = 0.35$  W/m K

$a_e$  - difuzivitatea termică a rășinii epoxidrice (pentru PVC  $0.08 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, pentru nylon  $0.09 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, pentru cauciuc  $0.13 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, estimată pentru rășina utilizată  $0.18 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s)

T - temperatura la care arde rășina T = 490°

Rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelul următor:

Tabel 3.2 Densitatea de flux termic pentru arderea rășinii

Durata de interacțiune [ms]	Densitatea de flux termic $q$ [W/cm <sup>2</sup> ]
0.8	$1.8 \cdot 10^3$
1.5	$1.3 \cdot 10^3$

### 3.2.3. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară fracturării termo-mecanice a fibrei de sticlă

Ruperea fibrei de sticlă atunci când asupra acesteia se aplică o densitate de flux termic constantă este un fenomen termo-mecanic, care poate fi tratat similar cu o transformare de fază a materialului. Aceasta se realizează prin echivalarea tensiunii necesare ruperii materialului cu căldura acumulată în material într-o transformare de fază. Se obțin următoarele relații:

$$q = \sigma \cdot u \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.16)$$

unde:

- $u$  [cm/s] - viteza de propagare a ruperii în fibra de sticlă;
- $\sigma$  [MPa] - tensiunea de rupere.

Se pune problema estimării nivelului densității de flux termic necesare ruperii fibrei de sticlă. Valoarea minimă impusă este cea care asigură ruperea fibrei de sticlă pe durata pulsului laser și poate fi calculată cu relația:

$$q_1 = \sigma \frac{z}{t_p} [\text{W/cm}^2] \quad (3.17)$$

unde  $z$ - grosimea fibrei de sticlă

Estimarea densității de flux termic pentru care ruperea fibrei de sticlă are loc cu viteză maximă pe durata pulsului laser se face cu relația [Ready, 1997]:

$$q_2 = \sigma \sqrt{\frac{a_s}{t_p}} \quad (3.18)$$

unde

$a_s$  - este difuzivitatea termică a fibrei de sticlă  $a_s = 0.34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$  (pentru diverse tipuri de sticlă se consideră valori orientative  $0.5-0.88 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ )

- conductivitatea termică  $0.043 \text{ W}/(\text{mK})$  la  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.079$  la  $200 \text{ }^\circ\text{C}$
- densitatea  $2.6 \text{ g/cm}^3$
- tensiunea de rupere  $3500 \text{ MPa}$
- căldura specifică pentru sticla cu siliciu  $c = 0.88 \text{ J/g} \cdot \text{grad}$

Rezultatele obținute pentru  $q_1$  și  $q_2$  sunt reproduse în tabelul 3.3.

Tabel 3.3 Densitatea de flux termic pentru fracturarea fibrei de sticlă

Timpul de interacțiune [ms]	Densitatea de flux termic $q_1$ [W/cm <sup>2</sup> ] $z = 0.1$ mm	Densitatea de flux termic $q_2$ [W/cm <sup>2</sup> ]
0.8	$4.3 \cdot 10^4$	$7.21 \cdot 10^3$
1.5	$2.33 \cdot 10^4$	$5.26 \cdot 10^3$

### 3.2.4. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară obținerii temperaturii de înmuiere și respectiv de topire a fibrei de sticlă

Încălzirea fibrei de sticlă implică două fenomene fizice importante și anume aducerea sticlei la temperatura de înmuiere și apoi aducerea sticlei la temperatura de topire. Determinarea densității de flux termic necesare atingerii acestor temperaturi critice este posibilă cu relația [Boboescu, 2010]:

$$q = \frac{0.885 k_s T_m}{\sqrt{a_s t_p}} \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.19)$$

Relația va fi aplicată pentru următoarele valori:

- temperatura de topire a sticlei 1720 °C
- temperatura de înmuiere a fibrei de sticlă 846 °C
- difuzivitate termică pentru sticlă  $a_s = 0.34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$
- conductivitate termică pentru fibra de sticlă 0.043 W/(mK) la 25 °C, 0.079 la 200 °C

Tabel 3.4 Densitatea de flux termic pentru încălzirea fibrei de sticlă

Timpul de interacțiune [ms]	Aducerea fibrei de sticlă la temperatura de topire	Aducerea fibrei de sticlă la temperatura de înmuiere
	Densitatea de flux termic $q$ [W/cm <sup>2</sup> ]	Densitatea de flux termic $q$ [W/cm <sup>2</sup> ]
0.8	$7.2 \cdot 10^2$	$3,54 \cdot 10^2$
1.5	$5.3 \cdot 10^2$	$2,58 \cdot 10^2$

### 3.2.5. Estimarea densității de flux termic $q$ necesară pentru realizarea topirii fibrei de sticlă

Realizarea efectivă a topirii sticlei presupune, pe lângă atingerea temperaturii de topire la suprafața materialului iradiat, aducerea întregii mase a materialului la temperatura de topire, precum și căldura latentă necesară topirii propriu-zise a



### 3.2 Condiții pentru penetrarea laser Nd:YAG a materialelor compozite **89**

materialului. După [Rykalin, 1978 ], căldura latentă necesară pentru topirea sticlei se consideră de 31000 kJ/kg. Se estimează o caldură suplimentară pentru încălzirea sticlei până la temperatura de topire de  $C \Delta T = 1680$  kJ/kg. Rezultă densitatea de flux termic necesară este (*tabelul 3.5*):

$$q = \rho L \sqrt{\frac{a_s}{t_p}} \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.20)$$

Tabel 3.5 Densitatea de flux termic pentru topirea fibrei de sticlă

Timpul de interacțiune [ms]	Densitatea de flux termic q [W/cm <sup>2</sup> ]
0.8	1.71 · 10 <sup>5</sup>
1.5	1.25 · 10 <sup>5</sup>

Tabel 3.6 Valorile maxime ale intensității fasciculului laser necesare pentru diferite fenomene fizice induse în materialul iradiat

Fenomenul fizic produs în material	Intensitatea fasciculului laser I [W/cm <sup>2</sup> ]
Arderea rășinii epoxidice	10 <sup>5</sup>
Propagarea fisurilor în sticlă	10 <sup>5</sup>
Fracturarea unei fibre de sticlă cu grosimea de 0.1 mm	10 <sup>6</sup>
Fracturarea unui pachet de fibre de sticlă cu grosimea de 1 mm	10 <sup>7</sup>
Aducerea sticlei la temperatura de înmuiere	10 <sup>4</sup>
Aducerea sticlei la temperatura de topire	5 · 10 <sup>4</sup>
Îndepărtarea sticlei în stare topită	10 <sup>8</sup>

Valorile anterior calculate pentru nivelul densității de flux termic necesar pentru a produce anumite fenomene termice va fi echivalat cu intensitatea fasciculului laser pentru un coeficient de absorbție de 1%. Această valoare a coeficientului de absorbție este minimă și face ca nivelele pentru intensitatea fasciculului laser prezentate să fie maximă. Rezultatele obținute sunt trecute în *tabelul 3.6*.

#### **3.2.6. Câteva aspecte fenomenologice ale penetrării laser a materialelor CEFS**

Rezultatele obținute anterior permit abordarea mecanismelor fizice care conduc la penetrarea materialului în condițiile tăierii laser a materialelor compozite investigate.

Astfel, de exemplu, la un nivel al intensității fasciculului laser de 10<sup>5</sup> [W/cm<sup>2</sup>] se produce atât arderea rășinii epoxidice, cât și propagarea fisurilor în sticlă.

Produsele descompunerii termochimice a materialului sunt îndepărtate cu ușurință de gazul asistent.

În momentul fisurării, sticla nu acumulează căldură care să fie condusă în material. Scăderea intensității fasciculului laser prin atenuare în profunzimea materialului produce un fenomen nedorit, care poate schimba mecanismul de penetrare. Astfel, fibra de sticlă se încălzește și ajunge la punctul de înmuiere. Fibra de sticlă conduce mai bine căldura decât rășina și astfel poate apărea arderea rășinii în jurul fibrei de sticlă deoarece încălzirea în material avansează prin fibra de sticlă. Odată ajunsă la punctul de înmuiere, sticla nu mai poate fi fisurată. Este necesară încălzirea sticlei la temperatura de topire și topirea acesteia. Sticla topită trebuie supraîncălzită pentru a avea vâscozitate scăzută și a putea fi îndepărtată în stare topită. Nivelul ales al intensității fasciculului laser este însă insuficient pentru a asigura îndepărtarea sticlei în stare topită și procesul de penetrare laser riscă să fi compromis.

În cazul în care se operează cu o intensitate de  $10^4$  [W/cm<sup>2</sup>], iradierea laser poate asigura atingerea temperaturii de topire și o topire superficială a materialului. Îndepărtarea sticlei în stare topită este însă un proces mult mai energofag, necesitând valori ale intensității fasciculului laser de  $10^8$  [W/cm<sup>2</sup>].

În mod firesc, la partea inferioară a tăieturilor realizate, pe suprafața interioară a acestora, au fost observate urme de sticlă topită și resolidificată. Consecința finală a situației descrise este blocarea penetrării în material a procesului de tăiere odată cu apariția sticlei topite sau înmuiate. Această oprire a penetrării laser a materialului este bruscă. Ea a fost probată de tăieturile incomplet penetrate.

Cea mai bună soluție pentru asigurarea penetrării complete a materialului sau pentru realizarea unei penetrări adaptate grosimii efective a materialului iradiat constă în creșterea controlată a intensității fasciculului laser incident.

În condiții reale, aceasta presupune fie mărirea puterii emise de sursa laser, fie micșorarea petei focale a fasciculului laser pe suprafața iradiată. Este deosebit de important ca zona de absorbție volumică a energiei radiației în material să mențină în centrul său o intensitate suficient de ridicată pe profunzimi apropiate de grosimea materialului.

Pentru asigurarea fezabilității proceselor de tăiere laser, în condițiile date, alături de un nivel ridicat al intensității fasciculului laser este necesară limitarea încălzirii fibrei de sticlă. La acest aspect intervine grosimea materialului. Astfel, un material mai gros conduce mai bine căldura în masa materialului și se evită atingerea punctului de înmuiere pentru sticlă. Se explică astfel de ce, pentru valori determinate ale intensității fasciculului laser, se pot tăia anumite grosimi de material, dar nu se pot tăia materiale mai subțiri decât acestea.

Folosirea regimului de iradiere laser pulsant poate reduce încălzirea fibrei de sticlă. Dacă durata pulsului este mult mai mică decât durata pauzei dintre pulsuri, atunci fibra de sticlă se poate răci între două pulsuri consecutive.

În programul experimental s-a utilizat această modalitate de a evita încălzirea fibrei de sticlă, folosind cicluri cu (ciclul a fost)  $\eta = 4.5\%$ , ceea ce reprezintă o valoare foarte mică.

Fortarea îndepărtării sticlei în stare topită este aparent posibilă prin creșterea duratei de interacțiune între radiația laser și material, realizată prin mărirea duratei pulsurilor și a numărului de pulsuri succesive care iradiază o arie dată a suprafeței materialului. În realitate, fără modificarea adecvată a intensității fasciculului laser, această variantă nu reprezintă o soluție, deoarece, în acest caz, crește afectarea termică a materialului prin conducția căldurii în material. Implicit, crește cantitatea de sticlă înmuiată sau topită și nu crește temperatura acesteia, care ar face posibilă îndepărtarea ei în stare topită. Pentru tăieturile realizate în condițiile decrișe, nu s-a pus în evidență îndepărtarea sticlei în stare topită. Aceasta ar duce la prezența urmelor de sticlă topită la partea inferioară a tăieturii, fenomen care nu a fost observat.

Oprirea procesului de penetrare a acțiunii laser în material, prin atingerea punctului de înmuiere pentru fibra de sticlă, conduce la o limitare drastică a zonei în care are loc îndepărtarea de material la tăierea cu fascicul laser. Există însă și un efect pozitiv al acestui fenomen și anume că, în cazul în care tăietura se finalizează totuși, prin limitarea zonei în care materialul este descompus termochimic, se produce o acțiune de auto-control a lățimii acesteia.

### **3.3 Estimarea experimentală a condițiilor de fezabilitate a tăierii laser**

Din cele prezentate anterior rezultă că, în cazul analizat, penetrarea materialului supus tăierii se realizează prin descompunerea termo-chimică a materialului, prin arderea rășinii și fracturarea fibrei de sticlă. Nivelul intensității fasciculului laser de  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> utilizat în experimente asigură descompunerea materialului. Modalitatea de penetrare a materialului prin descompunerea acestuia face ca efectele produse de variația factorilor care controlează gazul asistent să fie mai mici, în raport cu a factorilor ce controlează iradierea materialului. Susținerea penetrării materialului de către acțiunea gazului asistent asigură stabilitatea frontului de tăiere laser.

În primă analiză, examinarea condițiilor de penetrare laser a materialului iradiat poate fi redusă la principalul fenomen cu caracter restrictiv care are loc și anume, ruperea fibrei de sticlă. Dacă densitatea de flux termic, care asigură ruperea fibrei de sticlă, ar fi aplicată pe un material omogen cu densitatea medie a materialului compozit de 2.1 g/cm<sup>3</sup>, ar produce o transformare de fază cu caldura latentă de 16698 J/g, care s-ar propaga cu viteza de încălzire în material. Asocierea acesteia cu descompunerea materialului ar duce la o energie specifică de 35 J/mm<sup>3</sup>.

Fracturarea fibrei de sticlă ca fenomen prin care se produce penetrarea laser a materialului nu poate fi asociată cu realizarea stabilă a acestui proces. Sticla îndepărtată prin fracturi consecutive este dispersată. Materialul este eterogen și în grosimea sa, conține un număr variabil de fibre de sticlă. Este astfel dificil de a realiza estimări energetice care privesc îndepărtarea materialului.

## 92 Fezabilitatea proceselor de tăiere termica cu laser

Penetrarea materialului și stabilizarea frontului de tăiere constituie două etape ale procesului de tăiere care sunt direct legate de condițiile de iradiere a materialului.

Pentru evaluarea efectului acestora au fost examinate rezultatele experimentale care prezintă condiții extreme (p. 4.2.3.4.), cum ar fi tăieturi cu penetrări incomplete de adâncime constantă, inferioară grosimii materialului sau penetrări de adâncime variabilă, cu porțiuni străpunse alternând cu porțiuni nestrăpunse.

Evaluarea condițiilor de iradiere s-a făcut prin intensitatea fascicului laser și prin raportul **Spo** (p. 2.2.3.). Aceste două mărimi exprimă relativ independent condițiile de iradiere, luând în considerare toți factorii ce caracterizează regimul pulsant specific laserilor Nd:YAG.

În fig. 3.3 se prezintă variația profunzimii tăieturii cu intensitatea fascicului laser, pentru planurile experimentale 1.1 (tabelul 2.9) și 4.1 (tabelul 2.12). Pentru ambele planuri experimentale se observă creșterea profunzimii tăieturii cu intensitatea fascicului laser. Funcțiile de regresie arată o creștere de tip logaritmă. Creșterea este mai rapidă pentru **grosimi mai mari ale materialului**. Se observă că, pentru asigurarea unei penetrări determinate, la creșterea **grosimii materialului** este necesară o mărire a nivelului intensității fascicului laser.

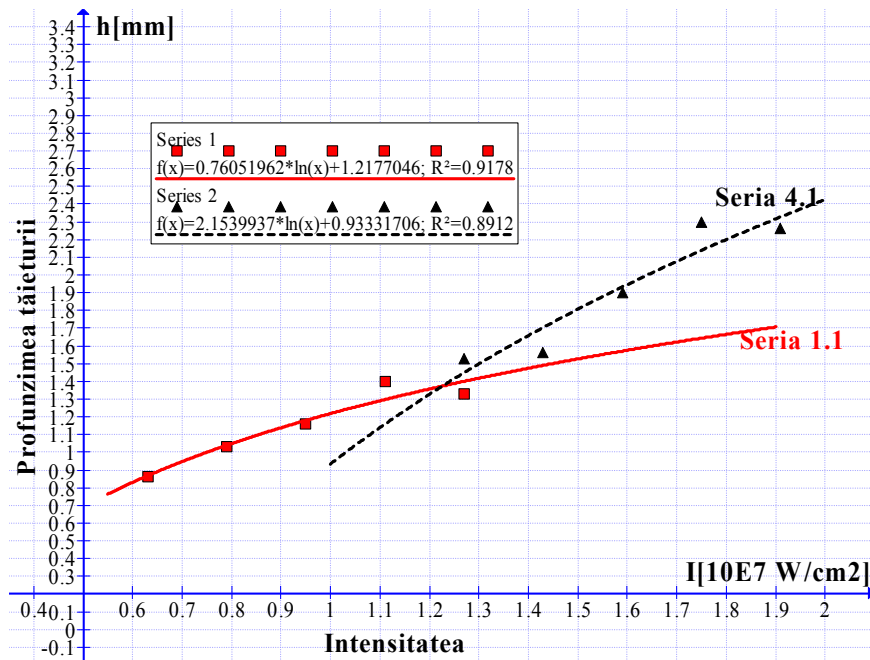


Fig. 3.3 Variația profunzimii tăieturii cu intensitatea fascicului laser

În fig. 3.4 se prezintă variația profunzimii tăieturii cu raportul **Spo** pentru planurile experimentale 1.1 (tabelul 2.9) și 4.1 (tabelul 2.12). Se observă că profunzimea tăieturii crește cu raportul **Spo**. Pentru **placa groasă**, această creștere este **instabilă**, se obține un **minim** la intensități mici ale fascicului laser.

### 3.3 Estimarea experimentală a condițiilor de fezabilitate a tăierii laser 93

Variațiile prezentate arată că profunzimea tăieturii crește cu puterea laser (prin intensitate) și scade cu viteza de tăiere, prin raportul **spo**.

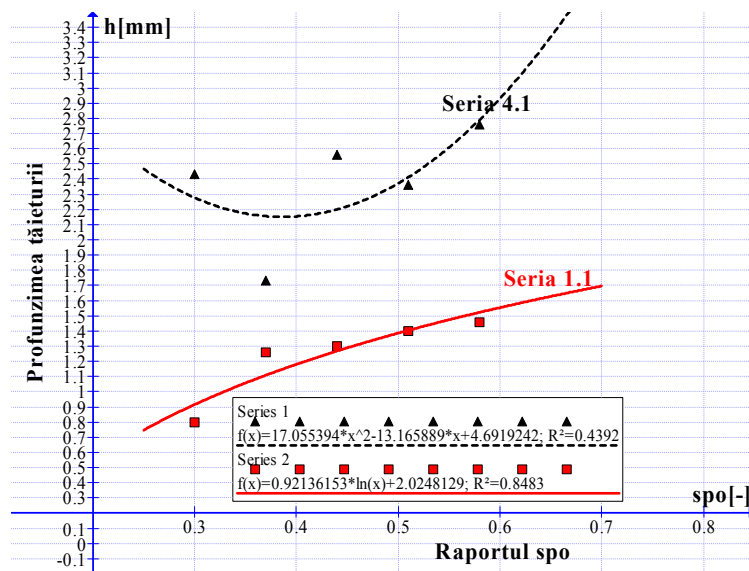


Fig. 3.4 Variația profunzimii tăieturii cu raportul spo

Pentru evaluarea condițiilor de propagare a frontului de tăiere s-a considerat utilă examinarea unor tăieturi care au fost complet penetrate și au fost de calitate corespunzătoare, ca o consecință a unui proces de tăiere laser corect proiectat și stabil. În acest scop, va fi analizată variația debitului prelucrării  $Q_p$  [mm<sup>3</sup>/min] cu același raport **Sp<sub>o</sub>**, considerat anterior.

În fig. 3.5. și 3.6. este reprezentată corelația dintre debitul prelucrării  $Q$  și raportul **Sp<sub>o</sub>** pentru câte două nivele diferite ale puterii laser și respectiv ale grosimii materialului.

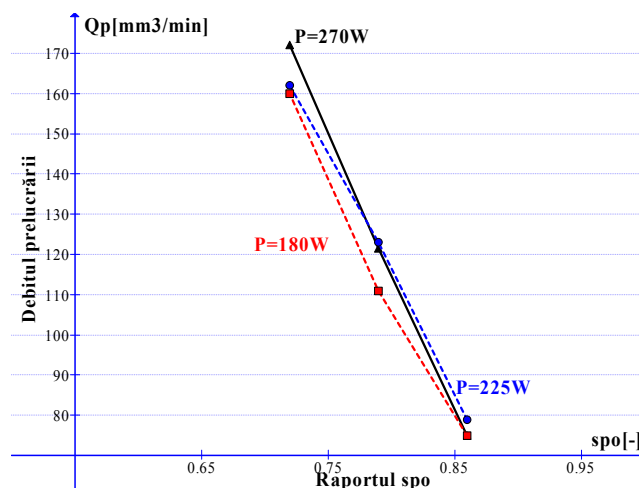


Fig. 3.5 Variația debitului prelucrării cu raportul **Sp<sub>o</sub>** pentru grosimea de 2 mm

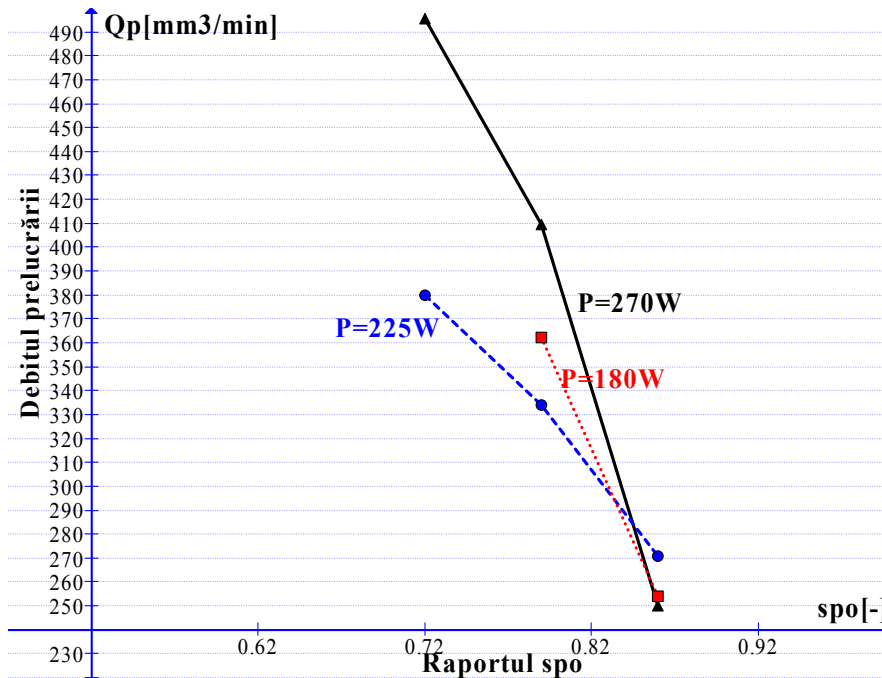


Fig. 3.6 Variația debitului prelucrării cu raportul  $Sp_0$  pentru grosimea de 4,2 mm

Se remarcă scăderea debitului prelucrării cu raportul  $Sp_0$ , variațiile fiind mai mari la grosimi mai mari ale materialului. În același timp, trebuie subliniată creșterea semnificativă a debitului prelucrării cu puterea laser. Creșterea raportului  $Sp_0$  are la bază scăderea vitezei de tăiere. La viteze de tăiere mai mici, o cotă parte tot mai redusă din energia transmisă materialului este efectiv utilizată pentru îndepărtarea materialului din zona de tăiere.

Datele experimentale prezentate arată că nivelul puterii laser este esențial pentru asigurarea penetrării materialului, iar cel al vitezei de tăiere-pentru realizarea propagării frontului de tăiere în material. Problemele legate de aceste aspecte ale procesului de tăiere laser sunt dificil de lămurit la nivel teoretic, însă pot fi abordate cu succes la nivel experimental.

### 3.4 Concluzii parțiale

În Capitolul 3 se prezintă câteva considerații referitoare la rolul fenomenelor termice în declanșarea și întreținerea proceselor de tăiere laser a materialului compozit. Se identifică și se analizează două tipuri de asemenea fenomene:

- încălzirea progresivă a materialului
- transformările termice ale materialului
- .

Pentru descrierea încălzirii materialului se utilizează ecuația de conducție a căldurii, pentru cazul unei densități de flux termic constante. În urma unei tratări unidimensionale a acestei probleme, se determină distanța de penetrare termică și dependența între densitatea de flux termic pe de o parte și timpul de încălzire și temperatura obținută la suprafața piesei, pe de altă parte.

Pentru transformările termice induse în material, densitatea de flux termic aplicată la suprafața materialului este asociată cu viteza de propagare a frontului de transformare termică și cu căldura latentă necesară pentru transformarea termică dată.

Pe baza relațiilor ce caracterizează, la nivel elementar, fenomenele termice descrise se studiază comportarea termică la iradiere laser a materialului CEFS. Se arată că eroziunea materialului se produce, în principal, prin arderea rășinii și fracturarea fibrei de sticlă. Înmuiera fibrei de sticlă și topirea sticlei sunt fenomene care restricționează penetrarea materialului.

În fine, se evidențiază experimental factorii care influențează procesul de penetrare laser a materialelor iradiate.

Se demonstrează că factorul principal care intervine în aspectele legate de penetrarea materialului, stabilitatea frontului de tăiere și propagarea acestuia în material este viteza de tăiere. În comparație cu ceilalți factori existenți, limitele între care se poate regla acest factor sunt semnificativ mai largi. Pe această bază, se poate pune și rezolva problema obținerii unor viteze de tăiere optime, în raport cu diferite criterii de performanță.

## 4. REZULTATELE CERCETĂRII EXPERIMENTALE (ASPECTE CANTITATIVE)

### 4.1. Strategia procesării datelor experimentale

Așa cum s-a subliniat în Introducere și în capitolele anterioare, obiectivele principale ale cercetării doctorale au fost:

- A.** modelarea matematică a corelațiilor de cauzalitate care controlează procesele de tăiere laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice polimerică și
- B.** evidențierea, cu ajutorul modelelor matematice obținute, a unor regimuri de tăiere favorabile din punct de vedere tehnologic și energetic.

Pentru atingerea acestor obiective a fost proiectat și pus în aplicare un program experimental complex, care integrează experimente clasice și factoriale, realizate la nivel de fază pilot și fază principală (cap. 2).

În succesiune firească, capitolul 4 va fi destinat arhivării, procesării și interpretării datelor furnizate de acest program experimental, în concordanță cu cerințele și obiectivele științifice și tehnologice asumate prin cercetarea doctorală.

Acțiunile enumerate au ca premisă logică faptul că principalul purtător de informație asupra evoluției, efectelor induse și eficienței proceselor de tăiere investigate este tăietura fizică, efectiv realizată în urma interacțiunii laser – material. Această tăietură poate fi caracterizată din următoarele puncte de vedere:

- geometric (de exemplu, formă, dimensiuni, poziție relativă, rugozitate);
- substanțial (de exemplu, micro- și macro-structuri alterate în zonele limitrofe tăieturii);
- energetic (de exemplu, tensiuni termice reziduale în materialul tăiat).

În contextul descris, stabilirea funcțiilor obiectiv și selecția factorilor de influență semnificativi ai proceselor de tăiere laser investigate s-au raportat la aceeași tăietură, considerată static și dinamic. O imagine de ansamblu a structurii și succesiunii logice a procesării datelor experimentale în condițiile specifice cercetării doctorale efectuate este prezentată în fig 4.1.

Funcțiile obiectiv FO (simbolizate în tabele și grafice cu  $Y_i$ ), asumate ca expresii ale legăturilor de cauzalitate dintre factorii de influență și efectele de interes tehnologic, în condițiile date, sunt :

- în cazul penetrării complete a materialului:
  - o lățimea tăieturilor la partea superioară a plăcilor  $Y_1 = B_s$  [mm];
  - o lățimea tăieturilor la partea inferioară a plăcilor  $Y_2 = B_i$  [mm];



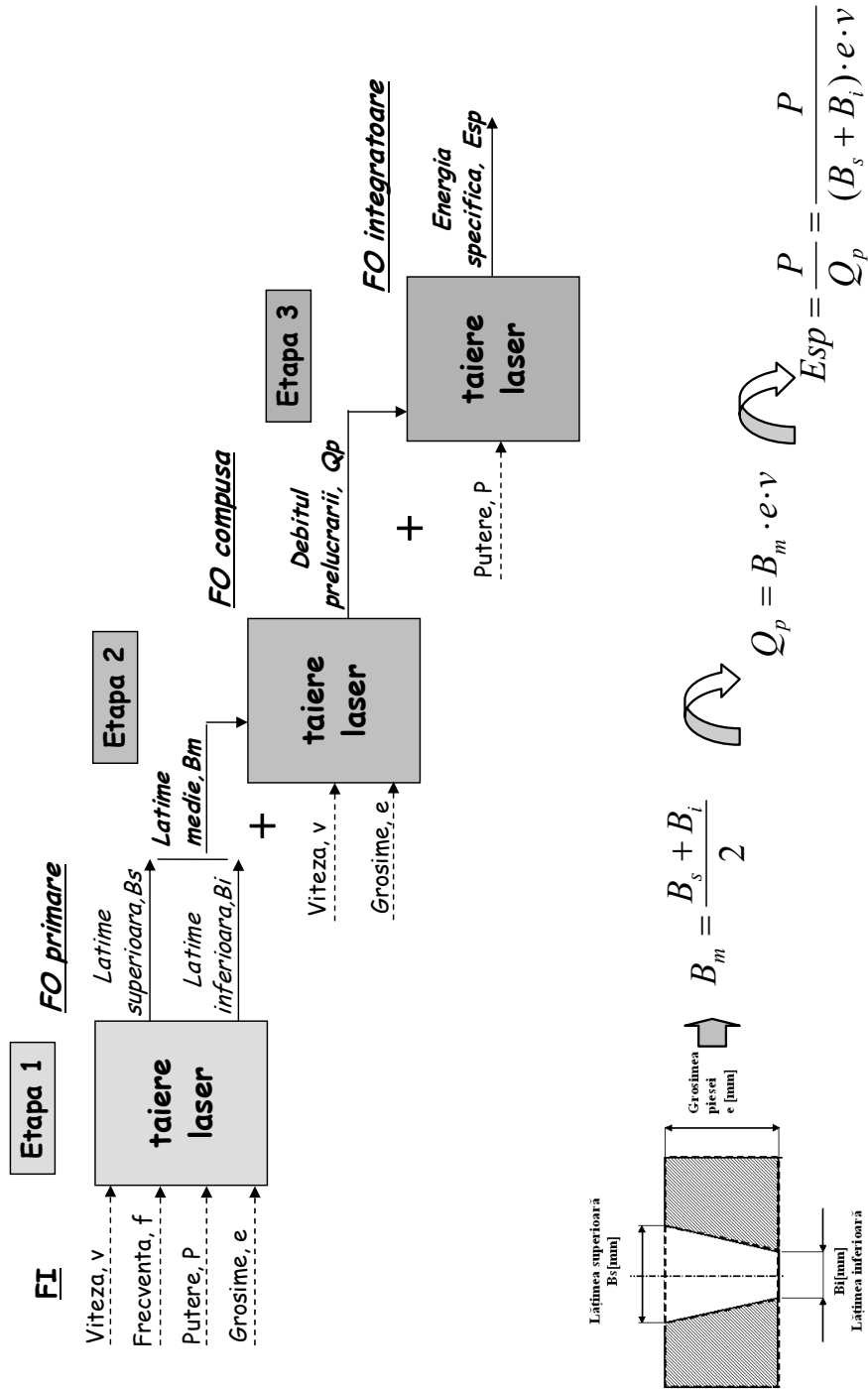


Fig. 4.1 Schema logică a procesării datelor experimentale  
 FI – factori de influență; FO – funcții obiectiv;

- lățimea medie a tăieturilor  $Y_3 = B_m$  [mm];
- debitul volumic al prelucrării  $Y_4 = Q_p$  [mm<sup>3</sup>/min];
- energia specifică de tăiere  $Y_5 = E_{sp}$  [J/mm<sup>3</sup>];
- în cazul penetrării incomplete a materialului:
  - profunzimea tăieturii  $h$  [mm];

Tăieturile realizate cu fasciculul laser prezintă numeroase variații macro- și micro-geometrice aleatoare în lungul direcției de tăiere, atât la suprafață cât și în profunzimea tăieturii. Pentru caracterizarea unitară a procesului de tăiere se va avea în vedere secțiunea transversală a tăieturii. Aceasta se va considera de formă trapezoidală pentru tăieturile complet penetrate și de formă triunghiulară, pentru tăieturile nepenetrante. Această formă idealizată a tăieturii este caracterizată prin valori medii pentru lățimea tăieturii la partea inferioară, respectiv la partea superioară și se consideră a fi invariabilă pe toată lungimea tăieturii.

Forma generală a secțiunii transversale a tăieturii este prezentată în fig. 4.2. Trebuie precizat, de asemenea, că la tăieturile străpunse doar lățimea superioară și lățimea inferioară depind de procesul de prelucrare, adâncimea tăieturii fiind egală cu grosimea materialului:  $h$  [mm] =  $e$  [mm], în timp ce la tăieturile nepătrunse, numai lățimea superioară și profunzimea tăieturii ( $h$ ) depind de procesul de prelucrare.

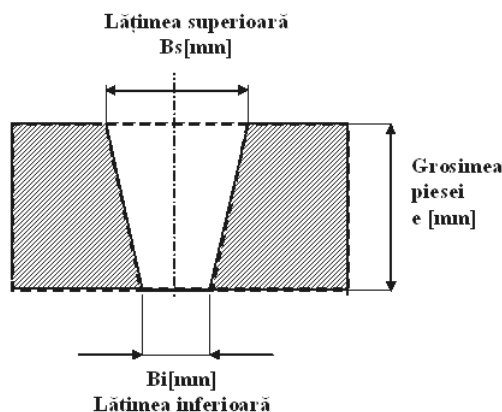


Fig. 4.2 Forma generală a secțiunii transversale a tăieturii

Partea superioară a tăieturii este partea piesei care a fost iradiată direct de fasciculul laser. În mulțimea încercărilor, s-au obținut două tipuri de tăieturi: tăieturi mai late la partea superioară, respectiv tăieturi mai late la partea inferioară.

Funcțiile obiectiv care urmează a fi studiate au fost deci definite și calculate funcție de secțiunea transversală a tăieturii. Din măsurători directe s-au determinat lățimea tăieturii la partea superioară  $B_s$  [mm], respectiv lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei  $B_i$  [mm]. Alături de aceste funcții obiectiv determinate direct prin măsurare, s-au determinat prin calcul și celelalte trei funcții obiectiv considerate. Acestea sunt prezentate în cele ce urmează:

a) **Lățimea medie a tăieturii  $B_m$ [mm]** reprezintă media aritmetică între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. Lățimea medie caracterizează în mod unitar tăietura realizată fără a specifica partea iradiată a piesei.

$$B_m = \frac{B_s + B_i}{2} \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

b) **Debitul prelucrării  $Q_p$** , reprezintă volumul de material prelevat în unitatea de timp. Debitul prelucrării se definește ca fiind produsul dintre aria secțiunii transversale a tăieturii, considerată de formă trapezoidală și viteza de tăiere.

$$Q_p = B_m \cdot e \cdot v \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad (4.2)$$

c) **Energia specifică  $E_{sp}$**  reprezintă energia consumată pentru îndepărtarea unității de volum de material. Această mărime caracterizează eficiența energetică a îndepărtării materialului, pentru condițiile particulare de iradiere laser în care s-a realizat tăietura respectivă. Energia specifică poate fi calculată prin raportul dintre puterea fasciculului laser și volumul de material îndepărtat în unitatea de timp, exprimat de debitul prelucrării:

$$E_{sp} = \frac{P}{Q_p} = \frac{P}{(B_s + B_i) \cdot e \cdot v} \text{ [J/mm}^3\text{]} \quad (4.3)$$

Principalii factori de influență FI controlabili, luați în considerare în condițiile programului experimental efectuat, au fost: puterea radiației laser **P [W]** (dependentă, în cazul unui regim de iradiere pulsant, de energia **Ep [J]** și frecvența pulsurilor succesive **f<sub>p</sub> [Hz]**), viteza de tăiere **v [mm/min]**, grosimea materialului supus tăierii **e [mm]** și, în mod excepțional, defocalizarea suprafeței iradiate **δ [mm]**.

Este important de remarcat (fig. 4.1.) caracterul secvențial, etapizat al metodicii de procesare a datelor experimentale, aplicate în prezenta cercetare doctorală. Acest caracter este determinat de natura intrinsecă a funcțiilor obiectiv urmărite – primare, compuse, integratoare, dar și de succesiunea logică a relațiilor de calcul aplicate.

Procesarea datelor experimentale nu este însă un scop în sine. Ea reprezintă un mijloc esențial de tranziție de la rezultatele nemijlocite ale programelor experimentale la o bază de date, informații și cunoștințe pertinente. O asemenea bază este absolut necesară pentru analiza, interpretarea și valorificarea rezultatelor globale ale cercetării doctorale.

Aprofundarea acțiunii de procesare a datelor experimentale prin prisma finalității acesteia, definită în paragraful anterior, este posibilă prin dezvoltarea unui model cibernetic intrări-ieșiri, care va fi aplicat fiecărei funcții obiectiv, definite anterior, în parte. Schema de analiză a unei funcții obiectiv, cu ajutorul acestui model cibernetic, este reprezentată în fig. 4.3.

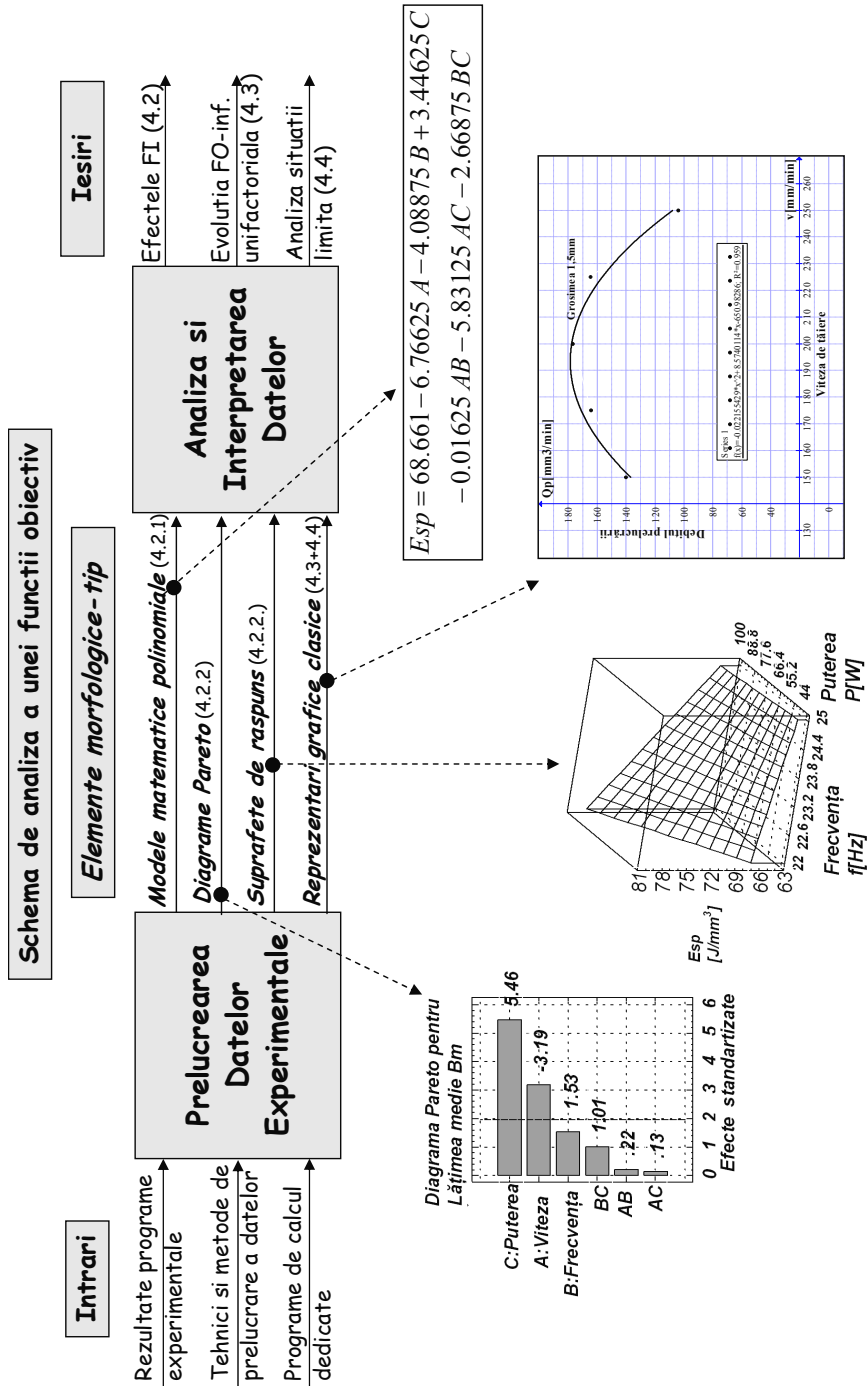


Fig. 4.3 Schema de analiză a unei funcţii obiectiv

Reprezentarea schematică din fig. 4.3., ca formă generalizată a metodicii de procesare a datelor experimentale specifice fiecărei funcții obiectiv individuale investigate în cadrul tezei, are o importanța deosebită pe multiple planuri.

Primul, faptul că procesarea datelor experimentale din teza de doctorat se finalizează printr-o mulțime de elemente morfologice de natură informațională, între care modele matematice empirice polinomiale, diagrame Pareto, suprafețe de răspuns și reprezentări grafice clasice. Caracterul sintetic, real, validat statistic al acestor elemente le conferă și o semnificație științifică de netăgăduit.

STATGRAPHICS sau STATG, așa cum a fost denumit pe parcursul lucrării, este un program de calculator, un soft care permite efectuarea unui mare număr de tipuri de aplicații statistice, cu utilizare și în prelucrarea datelor experimentale, dintre care se vor aminti cele de interes [STATGRAPHICS 92].:

- compararea mediilor aritmetice
- compararea dispersiilor
- experimente factoriale, etc.

În continuare sunt enumerate câteva dintre procedurile statistice permise de acest program, grupate pe familii. Deoarece numele procedurii nu e întotdeauna sugestiv, după denumirea fiecărei familii de instrucțiuni se fac câteva comentarii care explică domeniul abordat de procedurile care aparțin respectivei familii [Nichici, 1996b].

Deasemenea, deoarece traducerea în limba română a numelui unor proceduri nu numai că nu simplifică înțelegerea, ci poate genera chiar confuzii, s-a preferat păstrarea denumirii din limba engleză, fapt ce ușurează considerabil identificarea procedurii și lucrul efectiv cu programul STATG.

**1 - proceduri de reprezentare.** Familia cuprinde șapte proceduri care pot fi utilizate pentru realizarea unei reprezentări sugestive a datelor de tip numeric sau de tip caracter, dintre care se amintesc:

- X-Y Line and Scatterplots
- Multiple X-Y Plots
- X-Y-Z Line and Scatterplots
- Multiple X-Y-Z Plots

**2 - funcții de distribuție.** Familia cuprinde cinci proceduri ce permit utilizarea lor pentru determinarea funcției de distribuție a datelor, calculul valorilor critice și generarea de numere aleatoare:

- Distribution Fitting
- Distribution Plotting
- Critical Values
- Random Number Generation

**3 - proiectarea experimentelor.** Familia cuprinde un grup de trei proceduri care sunt utilizate pentru selectarea unei strategii experimentale înainte începerii colectării datelor. Aceasta asigură experimentatorul că analiza statistică pe care urmează să o facă are șanse de a duce la o identificare corectă a efectelor produse de factorii de influență:

- Screening Designs
- Response Surface Designs
- Response Surface Plotting

Toate procedurile amintite anterior pot fi utilizate în diferite situații concrete, iar posibilitățile de afișare a rezultatelor și de prezentare a concluziilor sunt extrem de numeroase, prezentând diverse variante chiar și în interiorul aceleiași proceduri [Nichici, 1996] [Nichici, 1996b] [Cicală 1996], [Cicală 2005a].

În ceea ce privește nivelul practic, aplicat în mod direct în lucrare, au fost introduse în program datele primare (lățimi măsurate, factori de influență, funcții obiectiv), iar pe baza procedurilor anterior amintite, au rezultat modele matematice empirice, diagrame Pareto, suprafețe de răspuns, respectiv diferite reprezentări clasice, elemente informaționale dezvoltate în continuare.

**Modelele matematice empirice** de tip polinomial, rezultate din procesarea datelor unor experimente factoriale (p. 2.1.), reprezintă ecuații matematice care cuantifică influența FI asupra FO prin ordinul polinomului, precum și prin valoarea numerică și semnul coeficienților de regresie asociați factorilor de influență individuali și interacțiunii dintre aceștia. [Nichici, 2004]

**Diagramele Pareto** sunt reprezentări ierarhizate ale efectelor factorilor de influență și interacțiunilor dintre aceștia asupra funcțiilor obiectiv. Efectele se calculează ca module ale dublului valorii coeficienților de regresie din modelul polinomial. Semnul asociat unui efect arată modul de variație a funcției obiectiv la modificarea unui factor de influență dat sau al interacțiunilor acestuia cu alți factori. Astfel, semnul "+" arată o creștere a valorilor funcției obiectiv, și semnul "-" arată o scădere a valorilor funcției obiectiv respective. Efectul de creștere sau scădere asupra valorilor funcției obiectiv a unui efect trebuie apreciat atât prin efectul propriu cât și prin cel al interacțiunilor la care participă. Efectele analizate sunt așezate în ordinea descrescătoare a modulelor, situația în care este prezentată interacțiunea ABC nu se întâlnește la diagramele prezentate deoarece s-a exclus interacțiunea de ordinul 3.

Pe lângă ierarhizarea efectelor, diagrama Pareto (standardizată) furnizează și o estimare a pragului de semnificație statistică al acestor efecte, marcat în diagramă printr-o linie verticală. Studiul statistic aferent este prezentat în Anexa 2. Acesta conține metoda de analiză a variațiilor ANOVA.

În cazul experimentelor factoriale de tip  $2^3$  (3 FI, având fiecare 2 nivele de variație), practicate în cadrul tezei, **suprafețele de răspuns** sunt reprezentări grafice tridimensionale ale variației unei funcții obiectiv pentru situația în care se modifică doi dintre factorii de influență, iar cel de-al treilea se consideră invariabil, cu valori în punctul central al programului experimental.

În cadrul cercetării doctorale efectuate, suprafețele de răspuns pentru cazurile analizate reprezintă funcții pătratice. Suprafețele nu prezintă minime sau maxime pe domeniul experimental, dar prezintă domenii pe care suprafața este curbată. Acest lucru se datorează tipului formulei de corelație utilizate, în care lipsește termenul la pătrat pentru factori. Funcția are gradul doi datorită prezenței interacțiunilor dintre câte doi factori.

Funcția de corelație consideră o variație liniară pentru fiecare factor de influență în parte. Astfel, invariabilitatea unuia dintre factori nu afectează interacțiunea între ceilalți doi. Prin aceasta devine util și important studiul suprafețelor de răspuns.

Analiza suprafețelor de răspuns (p.2.1.) este legată de problema optimizării. Pentru funcția obiectiv se formulează unele cerințe de optim, legate de condiții mai favorabile din punct de vedere tehnologic). Pe suprafața de răspuns acestea pot fi identificate prin valori minime sau maxime ale funcției obiectiv în domeniul experimental analizat sau la extremele acestuia. Pe suprafața de răspuns se pot identifica și linii care arată modul relativ, particular al influenței factorilor. Aplicații ale experimentelor factoriale sunt prezentate pentru procesele de prelucrare laser în lucrările [Cicală 2005b] [Cicală 2005 c] [Laslău 2009a], [Laslău 2009b], [Boboescu 2009a], [Boboescu 2009b] [Laslău 2010a], [Laslău 2010b], iar în particular pentru tăierea plăcilor de rășini armate cu fibră de sticlă în lucrările [Laslău 2006], [Laslău 2012a], [Laslău 2012b]

**Reprezentarea grafică clasică** este o reprezentare vizuală cantitativă a corelației/raportului dintre două sau mai multe mărimi fizice sau matematice, reprezentarea realizându-se cu ajutorul unor elemente geometrice specifice [Nichici, 2010]. În aceasta lucrare, în mod particular, reprezentările grafice clasice au la bază rezultatele unor planuri experimentale dedicate, de tip clasic, precum și rezultate particulare, compatibile cu acestea, extrase din programele experimentale de natură factorială.

Un al doilea aspect important al modelului cibernetic intrări-ieșiri reprezentat în fig. 4.3., de această dată asociat ieșirilor, este faptul că prin analiza și interpretarea elementelor informaționale dobândite experimental, în sine, dar și în corelație cu legile naturii și rezultatele altor cercetători, pot fi dezvoltate modele credibile mai generale. Astfel de modele au o arie de aplicabilitate mai largă și o capacitate de predicție sporită, inclusiv pentru identificarea unor stări limită, cum ar fi, de exemplu, stările de blocaj sau avarie.

În continuare, în cadrul capitolul 4, urmează a fi prezentate și analizate, în concordanță cu programele de experimentare definite în capitolul 2, elementele morfologice informaționale particulare, concrete, furnizate de procesarea datelor specifice funcțiilor obiectiv investigate. În final, se va încerca o generalizare a rezultatelor particulare obținute, urmărindu-se, corespunzător obiectivelor asumate, evidențierea celor mai favorabile condiții pentru creșterea debitului prelucrării și reducerea consumurilor specifice de energie.

## 4.2. Procesarea și interpretarea rezultatelor experimentale

### 4.2.1. Valorile funcțiilor obiectiv determinate experimental

Condițiile generale de desfășurare a programului experimental, inclusiv sistemul de achiziție a datelor de măsurare primare, au fost prezentate în detaliu în capitolul 2. În fig. 2.3 și 2.4 (p. 2.1.) sunt indicate domeniile spațiului multifactorial în care au fost localizate planurile experimentale PILOT și PRINCIPAL, cu componentele lor structurale factoriale E1F și E2F și, respectiv, clasice E2C.

#### 104 Rezultatele cercetării experimentale - aspecte cantitative

Metodele și mijloacele de măsurare a dimensiunilor tăieturilor realizate prin programul experimental efectuat au fost redate, în extenso, în paragraful 2.4. În fine, în Anexele 1, 2 și 3 ale tezei de doctorat sunt prezentate sintetic

- (1) valorile primare individuale și mediate ale lățimii tăieturilor;
- (2) valorile funcțiilor obiectiv pentru experimentul E2
- (3) tabele cu datele numerice ale analizei statistice ANOVA pentru experimentele E1F și E2F.

Pentru a facilita înțelegerea și urmărirea acțiunilor de procesare și interpretare a rezultatelor experimentale ale cercetării doctorale, în tabelele 4.1., 4.2. și 4.3. se prezintă valorile factorilor de influență și ale funcțiilor obiectiv corespunzătoare programelor experimentale E1F, E2F și E2C.

Tabelul 4.1. Valorile funcțiilor obiectiv pentru planul experimental factorial E1F

Încercarea	Viteza v [mm/min]	Frecvența f [Hz]	Puterea P [W]	$Y_1 = B_s$ [mm]	$Y_2 = B_i$ [mm]	$Y_3 = B_m$ [mm]	$Y_4 = Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_5 = E_{sp}$ [J/mm <sup>3</sup> ]
1	106,2	22	44	0,43	0	0,21	44,6	57,81
2	54	22	44	0,39	0,29	0,34	36,72	71,89
3	106,2	25	44	0,37	0	0,18	38,23	67,18
4	54	25	44	0,38	0,48	0,43	46,44	56,84
5	106,2	22	100	0,45	0,35	0,4	84,96	70,62
6	54	22	100	0,44	0,89	0,66	71,28	83,54
7	106,2	25	100	0,78	0,48	0,63	133,81	44,83
8	54	25	100	0,46	0,98	0,72	77,76	82,30
9	80,1	23,5	72	0,46	0,54	0,5	70,8	84,74

Tabelul 4.2. Valorile funcțiilor obiectiv pentru planul experimental factorial E2F

Încercarea	Viteza v [mm/min]	Puterea P [W]	Grosimea e [mm]	$Y_1 = B_s$ [mm]	$Y_2 = B_i$ [mm]	$Y_3 = B_m$ [mm]	$Y_4 = Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_5 = E_{sp}$ [J/mm <sup>3</sup> ]
1.	50	180	2	0,55	0,94	0,75	75	144,96
2.	100	180	2	0,59	1,01	0,8	160	67,5
3.	50	270	2	0,57	0,93	0,75	75	216
4.	100	270	2	0,67	1,05	0,86	172	94,18
5.	50	180	4,2	1,01	1,4	1,21	254,1	42,67
6.	100	180	4,2	1,02	0	0,51	139,23	77,56
7.	50	270	4,2	1,04	1,34	1,19	249,9	64,82
8.	100	270	4,2	1,05	1,3	1,18	495,6	32,82
9.	75	225	2	0,61	1,03	0,82	123	109,75
10.	75	225	2	0,59	1,04	0,82	123	110,42
11.	75	225	2	0,6	1,01	0,81	121,5	111,80



Tabelul 4.3. Valorile funcțiilor obiectiv pentru planul experimental clasic E2C

Încercarea	Viteza v [mm/min]	Puterea P [W]	Grosimea e [mm]	$Y_1=Bs$ [mm]	$Y_2=Bi$ [mm]	$Y_3=Bm$ [mm]	$Y_4=Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_5=Esp$ [J/mm <sup>3</sup> ]
1.	200	180	1,5	0,82	0,76	0,79	210,14	51,39
2.	200	157.5	1,5	0,68	0,77	0,73	204,4	46,55
3.	200	135	1,5	0,69	0,57	0,63	146,16	55,41
4.	200	112.5	1,5	0,58	0,6	0,59	121,54	55,53
5.	200	90	1,5	0,51	0	0,26	44,72	123,11
6.	150	135	1,5	0,67	0,61	0,64	140,16	57,79
7.	175	135	1,5	0,75	0,59	0,67	164,15	49,34
8.	200	135	1,5	0,74	0,61	0,68	176,8	46,15
9.	225	135	1,5	0,62	0,53	0,58	164,43	49,68
10.	250	135	1,5	0,64	0,39	0,52	104	78,64
11.	200	135	1,5	0,70	0,51	0,61	162,26	50,33
1.	100	180	1,7	0,8	0,88	0,84	142,8	75,63
2.	100	157.5	1,7	0,85	0,88	0,87	147,9	64,26
3.	100	135	1,7	0,67	0,55	0,61	103,7	78,10
4.	100	112.5	1,7	0,67	0,57	0,62	84,32	80,05
5.	100	90	1,7	0,61	0,49	0,55	71,5	75,52
6.	50	135	1,7	0,65	0,88	0,77	65,45	124,56
7.	75	135	1,7	0,73	0,94	0,84	107,1	76,08
8.	100	135	1,7	0,71	0,65	0,68	108,8	74,44
9.	125	135	1,7	0,64	0,57	0,61	86,16	94,78
10.	150	135	1,7	0,8	0,56	0,68	142,8	56,72
11.	100	135	1,7	0,58	0,92	0,75	127,5	63,52
1.	200	270	3,4	0,88	0	0,44	198,88	81,45
2.	200	247.5	3,4	0,88	0	0,44	202,4	72,77
3.	200	225	3,4	0,91	0	0,46	174,8	78,07
4.	200	202.5	3,4	0,81	0	0,41	127,92	96,15
5.	200	180	3,4	0,74	0	0,37	113,22	95,38
6.	150	225	3,4	0,93	0	0,47	194,58	70,12
7.	175	225	3,4	0,78	0	0,39	161,07	83,81
8.	200	225	3,4	0,96	0	0,48	245,76	54,93
9.	225	225	3,4	0,88	0	0,44	171,27	88,67
10.	250	225	3,4	0,94	0	0,47	285,52	47,28
11.	200	225	3,4	0,88	0	0,44	198,88	81,45
1.	100	270	4,6	0,99	1,48	1,24	570,4	28,51
2.	100	247.5	4,6	1,15	1,46	1,31	531,86	28,02
3.	100	225	4,6	1,35	1,26	1,31	558,06	24,28
4.	100	202.5	4,6	1,36	1,09	1,23	499,38	24,42

Încercarea	Viteza v [mm/min]	Puterea P [W]	Grosimea e [mm]	$Y_1=Bs$ [mm]	$Y_2=Bi$ [mm]	$Y_3=Bm$ [mm]	$Y_4=Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_5=Esp$ [J/mm <sup>3</sup> ]
5.	100	180	4,6	1,31	0,96	1,14	379,62	28,57
6.	50	225	4,6	1,21	1,63	1,42	326,6	41,33
7.	75	225	4,6	1,28	1,51	1,4	483	28,05
8.	100	225	4,6	1,41	1,22	1,32	531,96	25,47
9.	<b>125</b>	<b>225</b>	<b>4,6</b>	<b>1,38</b>	<b>0</b>	0,69	330,33	40,86
10.	<b>150</b>	<b>225</b>	<b>4,6</b>	<b>1,67</b>	<b>0</b>	0,84	398,16	34,10
11.	100	225	4,6	1,41	0,85	1,13	500,59	26,96

În secțiunile 4.2.2. și 4.2.3., care urmează, vor fi prezentate și analizate elementele morfologice tip, corespunzătoare funcțiilor obiectiv primare, compuse și integratoare, definite anterior (*figura 4.3.*). Prezentarea va începe cu experimentele factoriale E1F și E2F (p. 4.2.2.) și se va încheia cu experimentul clasic E2C (p. 4.2.3.). Trecerea în revistă a elementelor morfologice informaționale va respecta succesiunea indicată în *fig. 4.3.* și anume: modele matematice polinomiale, diagrame Pareto, suprafețe de răspuns și reprezentări grafice clasice.

În continuare, în modelele matematice polinomiale ale funcțiilor obiectiv analizate, mărimile A = viteza, B = frecvența și C = puterea fascicului laser sunt variabile substituie factorilor de influență din procesul real, în cazul experimentului E1F, iar D = viteza, E = putere, F = grosime, variabile substituie factorilor de influență, din procesul de tăiere real, în cazul experimentului E2. Relațiile de transformare variabile reale  $\leftrightarrow$  variabile substituie au fost prezentate în tabelul 2.6. pentru programul E1F, respectiv în tabelul 2.18 pentru E2.

## 4.2.2. Experimente factoriale

### 4.2.2.1. Funcții obiectiv primare: Lățimea tăieturii

Lățimea tăieturii, ca termen generic, este unul dintre cei mai importanți indicatori de performanță ai proceselor de tăiere cu laser. Ideal, se dorește o lățime cât mai mică a tăieturii, ceea ce asigură un consum minim de material și implicit un consum minim de energie pentru îndepărtarea acestuia din zona de separare. În condiții reale, fezabilitatea și stabilitatea proceselor de tăiere laser sunt însă condiționate de dezvoltarea unor lățimi suficient de mari ale tăieturii pentru a realiza penetrarea completă a materialului.

Această tendință se manifestă cu precădere la creșterea grosimii materialului și, respectiv, la intensificarea regimurilor de tăiere prin mărirea puterii laser și a vitezei de tăiere. Controlul lățimii de tăiere și, indirect, al geometriei tăieturii reprezintă unul din obiectivele prioritare ale optimizării proceselor de tăiere laser.

#### 4.2.2.1.1. Lățimea tăieturii la partea superioară Bs

Modelele matematice polinomiale corespunzătoare lățimii Bs a tăieturilor, în reprezentare codificată sunt reproduse în tabelul 4.4.

Tabelul 4.4. Modelul matematic polinomial pentru Bs [mm]

Experiment	Lățimea tăieturii la partea superioară Bs [mm]
E1F	$B_s = 0.462222 + 0.045 A + 0.035 B + 0.07 C +$ $+ 0.0325 AB + 0.0375 AC + 0.0525 BC$ $R^2 = 0.86 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.47$
E2F	$B_s = 0.754545 + 0.02 D + 0.02 E + 0.2175 F +$ $+ 0.0075 DE - 0.015 DF - 0.005 EF$ $R^2 = 0,79 \quad R^2(\text{adj. ford.f.}) = 0,49$

$R^2$  = coeficient de corelație, respectiv,  $R^2(\text{adj. ford.f.})$  = coeficient de corelație corectat pentru diferență.

Se poate observa că la ambele modele, datorită semnului pozitiv al coeficienților respectivi, lățimea tăieturii la partea superioară crește cu viteza de tăiere, frecvența pulsurilor, puterea laser și grosimea materialului, fenomen care se poate verifica și în diagramele Pareto standardizate corespunzătoare lățimii Bs din fig. 4.4 și 4.5.

Diagrama Pareto pentru  
Lățimea superioară Bs

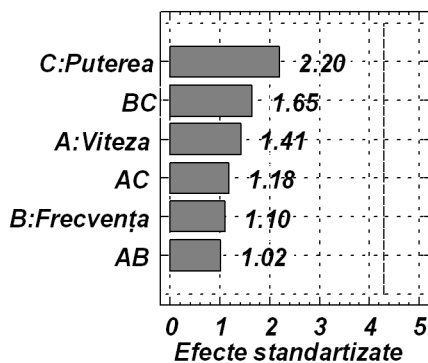


Fig. 4.4 Diagrama Pareto pentru lățimea tăieturii la partea superioară, experimentul E1F

Diagrama Pareto pentru  
Lățimii superioare Bs

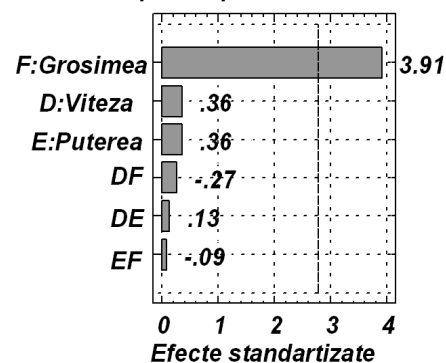


Fig. 4.5 Diagrama Pareto pentru lățimea tăieturii la partea superioară, experimentul E2F

În cazul experimentului E1F, pe primul loc este situat efectul puterii laser, urmat de cel al interacțiunii dintre frecvența pulsurilor și putere. Restul efectelor sunt crescătoare și aproape egale.

Toate efectele prezentate măresc lățimea  $B_s$  a tăieturii, ceea ce arată că arderea materialului se intensifică atât cu intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei, cât și cu timpul de interacțiune între radiația laser și material. Rolul principal îl are puterea laser, efectul acesteia fiind mai mare decât al factorilor care controlează timpul de interacțiune dintre radiație și material. Se arată astfel că intensitatea fasciculului laser are primul rol în descompunerea termică a materialului.

Un comportament interesant apare la creșterea lățimii tăieturii cu viteza de tăiere și cu frecvența. Deși creșterea vitezei de tăiere scade timpul de interacțiune dintre radiație și material, eficiența arderii/descompunerii termice a materialului crește prin aducerea în zona de interacțiune a unei cantități mai mari de reactanți și prin evitarea supraîncălzirii produșilor de reacție. Pe de altă parte creșterea timpului de interacțiune prin creșterea frecvenței conduce la mărirea zonei încălzite în care se va desfășura apoi descompunerea termică a materialului.

Deși ambele efecte ale timpului de interacțiune sunt reale, lipsa unei distincții clare între variația lățimii tăieturii la partea superioară cu frecvența, respectiv puterea, când unul dintre factori ar trebui să aibă efect contrar celuilalt se datorează corelației slabe a modelului matematic. Se observă că niciunul din efectele prezentate nu ating pragul de semnificație statistică.

În fig 4.5 se prezintă diagrama Pareto pentru lățimea la partea superioară a tăieturii, în experimentul E2F. Se observă că primul efect este cel produs de grosimea materialului. Acesta este și singurul efect care are semnificație statistică semnificativă. Următoarele efecte sunt cele ale vitezei de tăiere și puterii laser. Se constată creșterea lățimii la partea superioară  $B_s$  cu grosimea materialului. Acest lucru se explică prin faptul că numai pentru o tăietură lată la suprafață se poate obține îndepărtarea materialului dezintegrat termic din tăietură. Se observă că factorii individuali au un efect mai mare decât interacțiunea dintre ei. Interacțiunile grosimii materialului cu puterea și cu viteza scad lățimea tăieturii la suprafața piesei. Se arată astfel că, mărirea grosimii materialului pentru un nivel de iradiere dat, duce la scăderea lățimii tăieturii la suprafața piesei. Se remarcă, de asemenea, efectul vitezei de creștere a lățimii tăieturii la suprafața piesei. Astfel reducerea timpului de interacțiune favorizează descompunerea termică a materialului la suprafața piesei. Practic, în condițiile date, puterea și viteza au o influență aproape egală asupra lățimii tăieturii la suprafața piesei.

Comparația între fig. 4.4 și 4.5 rată că pentru experimentul E1F lățimea superioară este dependentă primordial de putere, iar la experimentul E2F influența principală este dată de grosimea materialului. Aceste efecte diferite se explică prin diferența între grosimea plăcilor. Astfel, la experimentul E1F, tăieturile sunt efectuate pe o placă subțire, iar la E2F folosirea unei plăci groase duce la creșterea pierderilor de căldură în material și prin aceasta la îngustarea tăieturii, așa cum s-a putut observa și în [Black, 1998]. Efectele factorilor de influență depind semnificativ de grosimea plăcii.

În fig. 4.6. și 4.7. sunt reprezentate diagrame ale suprafețelor de răspuns, reflectând dependența lățimii superioare a tăieturilor de puterea laser și de viteza de tăiere, în condițiile experimentelor E1F și respectiv E2F.

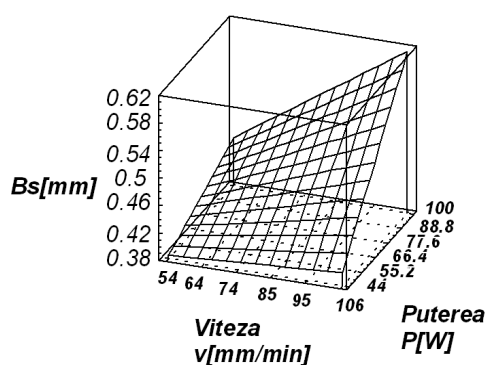


Fig 4.6 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea superioară funcție de viteză și putere, experimentul E1F

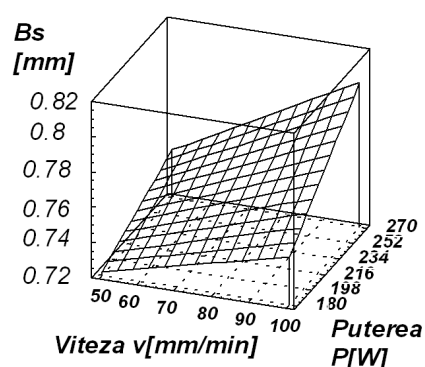


Fig 4.7 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea superioară funcție de viteză și putere, experimentul E2F

Din examinarea fig. 4.6 se observă că lățimea  $B_s$  a tăieturii crește cu viteza și puterea. Creșterea lățimii tăieturii cu puterea laser este nesemnificativă la puteri mici și mai accentuată la puteri mari. Astfel, pentru fiecare din cei 2 factori de influență, o valoare minimă a unuia face ca variația (creșterea) celuilalt pe domeniul experimental să fie tot minimă.

Din examinarea fig. 4.7. se observă că, pe domeniul experimental investigat, lățimea tăieturii la suprafață  $B_s$  crește atât cu viteza de tăiere cât și cu puterea laser. Valorile minime pentru lățimea tăieturii se obțin la viteza de tăiere minimă și putere minimă. Se observă că variația datorată puterii și vitezei pe domeniul experimental se situează în jurul valorii de 0,1 mm. Variația prezentată de suprafață de răspuns este cantitativ mică. Astfel, nu se pot recomanda anumite valori pentru factorii de influență variați, putere sau viteză, sau se recomandă valori apropiate de cele care desemnează punctul central al experimentului.

Comparând suprafețele de răspuns corespunzătoare dependenței lățimii  $B_s$  a tăieturii de puterea și viteza pentru cele două experimente factoriale E1F și E2F, se poate observa ca tendința de variație este similară și anume, de creștere a lățimii tăieturii atât cu puterea laser, cât și cu viteza de tăiere. O asemenea variație a fost constatată și în lucrarea [Black, 1998], atestând corelația existentă între puterea laser și viteza de tăiere.

#### 4.2.2.1.2. Lățimea tăieturii la partea inferioară $B_i$

Modelele matematice polinomiale corespunzătoare lățimii  $B_i$  a tăieturilor, în reprezentare codificată sunt reproduse în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5. Modelul matematic pentru Bi [mm]

Experiment	Lăţimea tăieturii la partea inferioară Bi [mm]
E1F	$Bi = 0.445556 - 0.22625 A + 0.05125 B + 0.24125 C - 0.01875 C^2$ $- 0.01875 AB - 0.03375 AC + 0.00375 BC$ $R^2 = 0.98 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.92$
E2F	$Bi = 1.00455 - 0.15625 D + 0.15875 E + 0.01375 F +$ $+ 0.17625 DE - 0.20375 DF + 0.15125 EF$ $R^2 = 0.84 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.60$

$R^2$  - coeficient de corelaţie,  $R^2(\text{adj. for d. f.})$  - coeficient de corelaţie corectat pentru diferenţă

Se poate observa că la ambele modele, datorită semnului negativ al coeficientului respectiv, lăţimea tăieturii la partea inferioară scade cu viteza de tăiere pentru ambele modele, şi datorită coeficienţilor pozitivi, lăţimea la partea inferioară creşte cu frecvenţa pulsurilor, puterea laser şi grosimea materialului, ceea ce se poate observa şi în diagramele Pareto din fig. 4.8. şi 4.9.

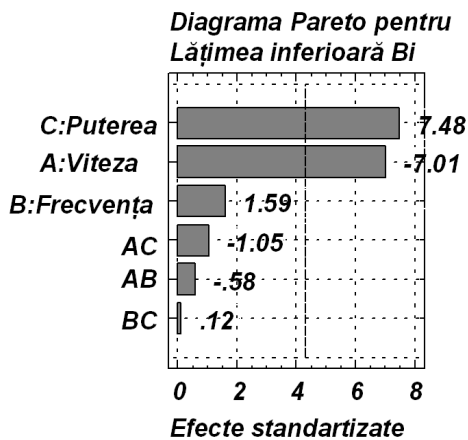


Fig. 4.8 Diagrama Pareto pentru lăţimea tăieturii la partea inferioară, experimentul E1F

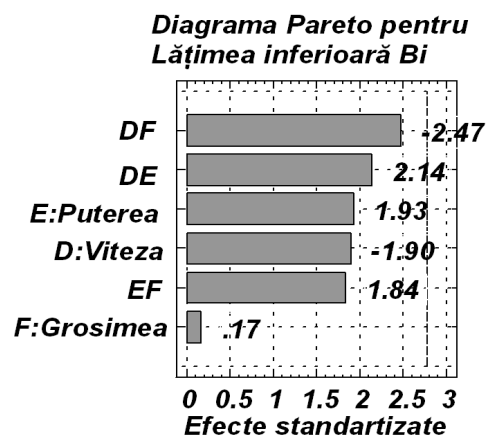


Fig. 4.9 Diagrama Pareto pentru lăţimea tăieturii la partea inferioară, experimentul E2F

În fig. 4.8 este prezentată diagrama Pareto pentru lăţimea tăieturii la partea inferioară. Dacă pentru lăţimea tăieturii la partea superioară toţi factorii determinau creşterea acesteia, pentru lăţimea tăieturii la partea inferioară acest lucru se schimbă. Obţinerea lăţimii la partea inferioară a tăieturii este asociată cu propagarea descompunerii termice a materialului în interiorul acestuia. Se observă că primul efect este cel datorat puterii urmat de cel al vitezei. Cele două efecte au semnificaţie statistică semnificativa. Se observă că, mărirea lăţimii tăieturii la partea inferioară cu puterea este aproape compensată de scăderea cu viteza. Mai mult, efectul de scădere este prezent şi la cele două interacţiuni ale vitezei. Astfel că, pe

ansamblu efectul de scădere a lățimii tăieturii la partea inferioară cu viteza este mai mare decât cel de creștere cu puterea.

Frecvența și interacțiunea dintre frecvență și putere au un efect de creștere. Există un echilibru între efectul puterii și cel al vitezei. În aceste condiții, lățimea tăieturii la partea inferioară devine sensibilă la variațiile provocate de frecvență. Se observă că efectele produse de factorii de influență sunt mai mari decât cele produse de interacțiunile între ei.

În fig. 4.9 se prezintă diagrama Pareto pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii. Se observă că nici unul dintre efecte nu atinge semnificația statistică. Primul efect este cel al interacțiunii dintre viteză și grosime. Al doilea efect este cel al interacțiunii dintre putere și viteză, urmat de cel al puterii și al vitezei de tăiere. Se remarcă faptul că efectul unei interacțiuni la care participă grosimea materialului este mai mare decât cel al factorilor care determină iradierea și a interacțiunii dintre acestea. De asemenea, se mai poate observa că efectul interacțiunii dintre grosime și putere este considerabil. Grosimea are ultimul efect, fiind nesemnificativ însă interacțiunile la care participă grosimea sunt importante. Se observă că interacțiunea dintre viteză și grosime scade lățimea tăieturii la partea inferioară în timp ce interacțiunea dintre putere și viteză o crește. Se observă că puterea care controlează intensitatea crește lățimea la partea inferioară a tăieturii. Creșterea vitezei va scădea timpul de interacțiune dintre radiația laser și material, astfel viteza va scădea lățimea tăieturii la partea inferioară așa cum arată diagrama Pareto.

Se remarcă, că atât ca efecte proprii cât și prin interacțiuni puterea acționează în sensul creșterii lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei iar, viteza de tăiere, în sensul scăderii lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei.

Comparația între fig. 4.8 și 4.9 arată că modelul matematic de la experimentul E1F prezice cu un grad de încredere relativ ridicat efectele puterii și vitezei de tăiere asupra lățimii tăieturii. Se observă că efectul vitezei de tăiere este contrar față de cel al puterii. Acesta este mai mare decât efectul interacțiunilor de ordinul doi. Pentru experimentul E2F se arată că interacțiunea dintre viteză și grosimea materialului are primul efect asupra lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei.

În fig. 4.10 se prezintă suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară cu viteza de tăiere și cu puterea. Se observă că lățimea tăieturii scade cu viteza de tăiere și crește puternic cu puterea. Creșterea cu puterea este mai mare la viteze de tăiere mici. Se arată astfel că pentru lățimea tăieturii la partea inferioară intensitatea fasciculului laser are un rol mai mare decât timpul de interacțiune. Se observă că, creșterea vitezei de tăiere asociată cu scăderea puterii duce la nerealizarea tăieturii. Cazul contrar, viteza de tăiere mică și putere crescută duce la realizarea de tăieturi late care nu vor prezenta o calitate bună a suprafețelor. Din punct de vedere tehnologic se recomandă folosirea unor valori ridicate ale vitezei de tăiere însoțite de valori ridicate ale puterii.

Suprafața de răspuns din fig 4.11 arată variația lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei în funcție de putere și viteză. Cu excepția puterii maxime are loc o scădere a lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei cu viteza de tăiere. La viteze de tăiere mici, lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei este practic

independentă de putere. La viteza de tăiere ridicată există o puternică creștere a lățimii tăieturii la partea inferioară cu puterea. Valorile minime ale lățimii tăieturii la partea inferioară a tăieturii se obțin pentru viteză de tăiere maximă și putere minimă. Nu se recomandă utilizarea de valori ridicate ale puterii și valori scăzute ale vitezei de tăiere care duc la creșterea puternică a lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei. În această situație apar instabilități în procesul de tăiere.

Comparația între suprafețele de răspuns din fig. 4.10 și 4.11 pentru lățimea tăieturii la partea inferioară a tăieturii arată că pentru ambele experimente există scăderea lățimii tăieturii la partea inferioară cu viteza de tăiere, așa cum în lucrarea [Pan, 1998], [Oliveira, 2008] lățimea tăieturii, respectiv zona influențată termic scade cu viteza. La puteri mici există același mod de variație.

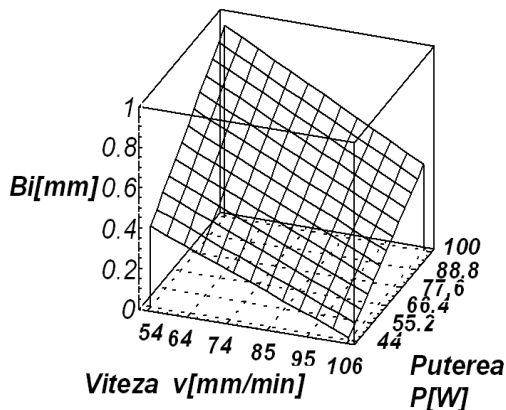


Fig. 4.10 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară funcție de viteză și putere, experimentul E1F

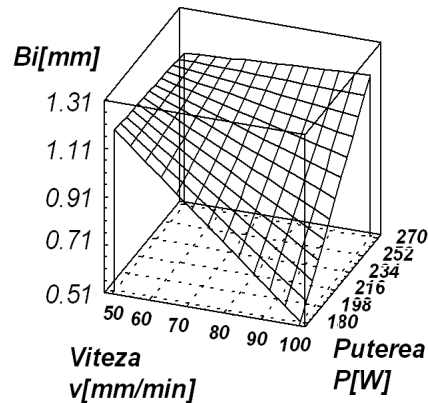


Fig. 4.11 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii la partea inferioară funcție de viteză și putere, experimentul E2F

Dacă experimentul E1F arată o variație de tip liniar pe domeniul experimental, la experimentul E2F se arată că la puteri ridicate și viteze de tăiere reduse variațiile pe domeniul experimental sunt minime. Astfel se arată că valorile factorilor influențează semnificativ lățimea tăieturii la partea inferioară.

#### 4.2.2.1.3. Lățimea medie a tăieturii $B_m$

Modelele matematice polinomiale corespunzătoare lățimii  $B_m$  a tăieturilor, în reprezentare codificată sunt reproduse în tabelul 4.6.

Se poate observa că la ambele modele, datorită semnului negativ al coeficientului respectiv, lățimea medie a tăieturii scade cu viteza de tăiere pentru ambele modele, și datorită semnului pozitiv, crește cu frecvența pulsurilor, puterea laser și grosimea materialului, ceea ce se poate observa și în diagramele Pareto standardizate corespunzătoare lățimii medii a tăieturii din fig. 4.12 și 4.13.



Tabelul 4.6. Modelul matematic pentru Bm [mm]

Experiment	Lățimea medie a tăieturii Bm [mm]
E1F	$Bm = 0.452222 - 0.09125 A + 0.04375 B + 0.15625 C +$ $+ 0.00625 AB + 0.00375 AC + 0.02875 BC$ $R^2 = 0.95 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.82$
E2F	$Bm = 0.881818 - 0.06875 D + 0.08875 E + 0.11625 F +$ $+ 0.09375 DE - 0.10875 DF + 0.07375 EF$ $R^2 = 0.86 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.65$

$R^2$  - coeficient de corelație,  $R^2(\text{adj. for d. f.})$  - coeficient de corelație corectat pentru diferență.

Lățimea medie a tăieturii caracterizează procesul de tăiere. Pentru aceasta se prezintă o imagine combinată a efectelor observate la partea superioară, respectiv la partea inferioară a tăieturii.

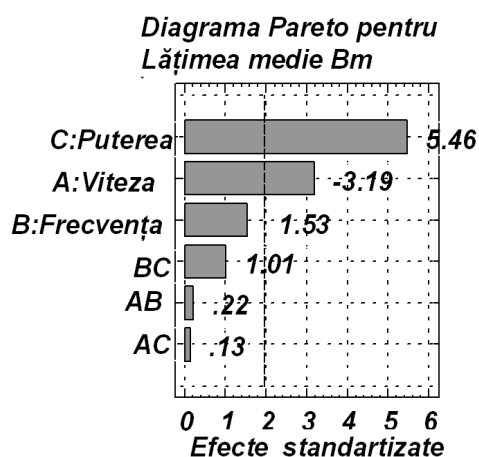


Fig. 4.12 Diagrama Pareto pentru lățimea medie a tăieturii, experimentul E1F

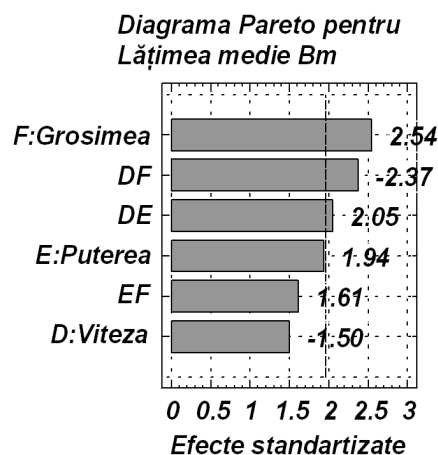


Fig. 4.13 Diagrama Pareto pentru lățimea medie a tăieturii, experimentul E2F

În fig. 4.12 se prezintă diagrama Pareto pentru lățimea medie a tăieturii. Primul efect este cel al puterii, urmat de cel al vitezei de tăiere și de efectul frecvenței. Efectele datorate factorilor sunt mai mari decât cele ale interacțiunilor între aceștia. Primele două efecte ale puterii, respectiv ale vitezei de tăiere ating pragul de semnificație statistică. Se observă că lățimea tăieturii crește cu puterea în principal, la care se adaugă un efect mai redus de creștere cu interacțiunile la care participă puterea. Viteza de tăiere produce un efect de scădere a lățimii tăieturii, fiind și singurul efect care scade lățimea tăieturii. Frecvența produce o ușoară creștere a lățimii tăieturii. Se arată astfel că, primul rol în stabilirea lățimii medii a

tăieturii îl are intensitatea fascicului laser prin putere, iar al doilea rol îl are timpul de interacțiune între radiația laser și material prin viteza de tăiere.

Diagrama Pareto pentru lățimea medie a tăieturii este prezentată în fig. 4.13. Aceasta este asemanătoare cu variația obținută pentru lățimea tăieturii la partea inferioară. Există un număr important de efecte pentru care se obține corelație statistică. Primul efect este al grosimii plăcii, la fel pentru lățimea la partea superioară a tăieturii. Al doilea efect îl constituie interacțiunea dintre viteză și grosime, la fel ca și pentru lățimea la partea inferioară a tăieturii. Apoi urmează efecte care caracterizează iradierea materialului, și anume interacțiunea dintre putere și viteză. Efectele fără semnificație statistică sunt cele ale interacțiunii dintre putere și viteză și cel al vitezei. Deși viteza are ultimul efect, aceasta produce efecte mai puternice prin interacțiunile sale. Toate efectele prezentate sunt semnificative, având valori apropiate unele de altele. Se observă că, lățimea tăieturii crește cu grosimea materialului și scade cu interacțiunea între grosimea materialului și viteza.

Puterea, factor care controlează intensitatea fascicului laser va produce creșterea lățimii medii a tăieturii prin efectul ei și prin efectele interacțiunilor la care participă. Viteza, a cărei creștere produce scăderea timpului de interacțiune între radiația laser și material prin efectul ei și prin efectul interacțiunii ei cu grosimea, scade lățimea medie a tăieturii. Diagrama Pareto arată că, pentru a obține anumite lățimi ale tăieturii, este necesar să se realizeze o adaptare între grosimea de material folosită și putere. Creșterea lățimii medii a tăieturii cu grosimea materialului este necesară pentru a obține îndepărtarea materialului din tăietură.

Comparația între diagramele Pareto din fig. 4.12 și 4.13 arată că lățimea medie a tăieturii depinde pentru placa subțire de la E1F direct de factorii putere și viteză, iar pentru placa groasă de la experimentul E2F dependența principală este dată de grosimea materialului. Prin aceasta se arată că plăcile subțiri se comportă diferit din punct de vedere termic față de cele groase, așa cum s-a văzut și în lucrările [Black, 1998], [Nasedkin, 1999].

Suprafața de răspuns din fig. 4.14 arată variația lățimii medii în funcție de viteză și de putere. Se arată că, lățimea tăieturii scade cu viteza și crește cu puterea. Acest tip de variație se menține pe tot domeniul experimental. Lățimi minime ale tăieturii se obțin pentru viteza de tăiere ridicată și putere scăzută.

Suprafețele de răspuns pentru lățimea medie arată o comportare tip care poate fi identificată atât la tăiere cât și la alte procese de prelucrare cu fascicul laser în ceea ce privește condițiile de iradiere. Aceasta se formulează ca: funcția obiectiv crește cu puterea și scade cu viteza.

Suprafața de răspuns din fig. 4.15 prezintă variația lățimii medii a tăieturii cu puterea și viteza. La viteze de tăiere mici lățimea medie a tăieturii rămâne aproape constantă cu puterea. La puteri mari, există o ușoară creștere a lățimii tăieturii cu viteza de tăiere. Pe restul domeniului experimental există o scădere puternică a lățimii tăieturii cu puterea și o scădere cu viteza de tăiere. Valorile minime ale lățimii tăieturii se obțin la viteza de tăiere maximă și putere minimă.

Comparația între suprafețele de răspuns din fig. 4.14 și 4.15 pentru lățimea medie a tăieturii arată că pe domeniul experimental există o scădere a lățimii

tăieturii cu viteza de tăiere, similar cu lucrarea [Pan, 1998], unde lățimea tăieturii scade cu viteza de tăiere.

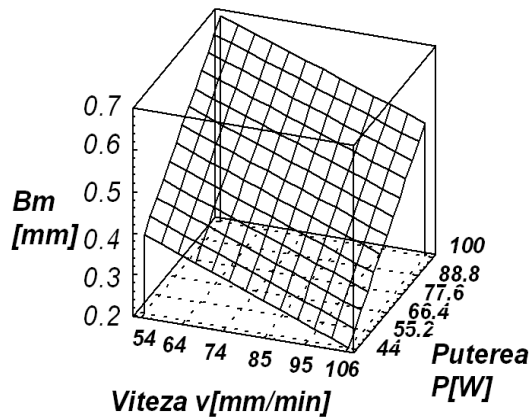


Fig. 4.14 Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii funcție de viteză și putere, experimentul E1F

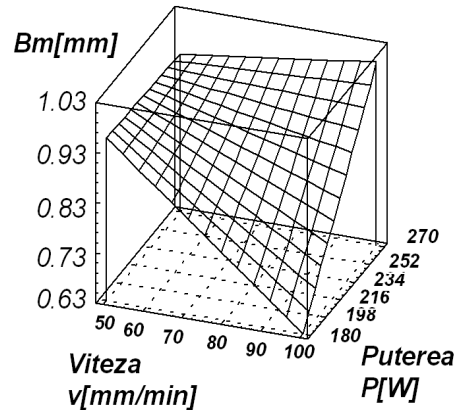


Fig. 4.15 Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii funcție de viteză și putere, experimentul E2F

Variația este similară cu cea pentru lățimea tăieturii la partea inferioară. Se arată că pentru ambele experimente combinația dintre puterea scăzută și viteza de tăiere ridicată conduce la scăderea lățimii tăieturii. În această situație pot apărea tăieturi incomplete.

#### 4.2.2.2. Funcții obiectiv compuse: Debitul prelucrării

Debitul prelucrării  $Q_p$  [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ] este principalul indicator al productivității tehnologice a proceselor de tăiere laser. În principiu, valoarea sa este proporțională cu cota parte din puterea laser iradiată pe suprafața materialului, care este absorbită de material și este efectiv utilizată pentru îndepărtarea materialului din zona tăierii.

Randamentul conversiei de energie care are loc este însă dependent de regimul de lucru al tăierii (putere laser și viteză de tăiere, eventual defocalizare fascicul laser) și respectiv de condițiile specifice de tăiere, cum ar fi, de exemplu, natura, proprietățile optice și termice și grosimea materialului prelucrat, natura și regimul de curgere a gazului de lucru etc.

Modelele matematice polinomiale corespunzătoare debitului prelucrării  $Q_p$ , în reprezentare codificată, sunt reproduse în tabelul 4.7.

Se poate observa că la ambele modele, datorită semnului pozitiv al coeficienților respectivi, debitul prelucrării crește cu viteza de tăiere, frecvența pulsurilor, puterea laser și grosimea materialului, ceea ce se poate observa și în diagramele Pareto standardizate corespunzătoare debitului prelucrării din fig. 4.16 și 4.17.

Tabelul 4.7. Modelul matematic pentru  $Q_p$  [mm<sup>3</sup>/min]

Experiment	Debitul prelucrării $Q_p$ [mm <sup>3</sup> /min]
E1F	$Q_p = 67.1778 + 8.675 A + 7.335 B + 25.2275 C +$ $+ 3.285 AB + 8.7575 AC + 6.4975 BC$ [mm <sup>3</sup> /min] $R^2 = 0.94 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.76$
E2F	$Q_p = 180.757 + 39.1038 D + 45.5212 E + 82.1037 F +$ $+ 46.5713 DE - 6.39625 DF + 42.5212 EF$ [mm <sup>3</sup> /min] $R^2 = 0.79 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.49$

$R^2$  = coeficient de corelație, respectiv,  $R^2(\text{adj. for d. f.})$  = coeficient de corelație corectat pentru diferență.

În fig. 4.16 este prezentată diagrama Pareto pentru debitul prelucrării. Funcția obiectiv analizată este proporțională cu viteza și cu lățimea medie a tăieturii. Primul efect asupra debitului de prelucrare îl are puterea. Acest efect prezintă semnificația statistică, fiind singurul cu această proprietate. Efectul puterii este urmat de cel al interacțiunii dintre putere și viteză și cel al vitezei.

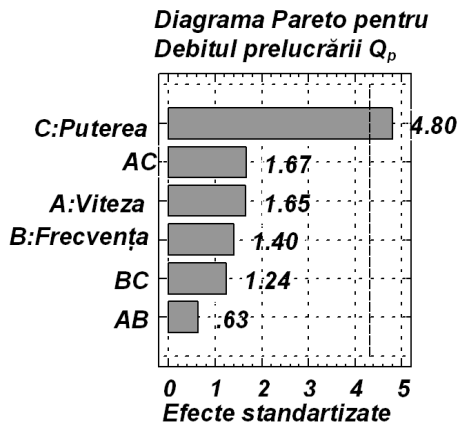


Fig. 4.16 Diagrama Pareto pentru debitul prelucrării, experimentul E1F

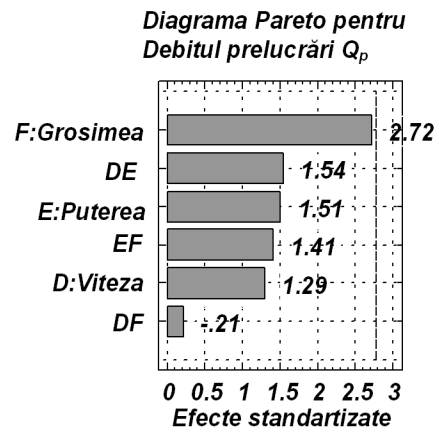


Fig 4.17 Diagrama Pareto pentru debitul prelucrării, experimentul E2F

Toate efectele factorilor de influența cresc funcția obiectiv. Astfel funcția obiectiv crește indiferent de variația timpului de interacțiune între radiația laser și material, prin viteză și putere. Se amintește că, funcția obiectiv este proporțională cu viteza de tăiere. Se arată că, efectul principal asupra creșterii debitului prelucrării îl are puterea.

Debitul de prelucrare este proporțional cu lățimea medie a tăieturii, grosimea materialului și viteza de tăiere. Toate cele 3 măsuri variază pentru experimentul realizat. Din punct de vedere tehnologic se impune condiția ca debitul de prelucrare să fie maxim.

În fig. 4.17 se prezintă diagrama Pareto pentru debitul de prelucrare. Primul efect este cel al grosimii plăcii urmat de efectele factorilor care caracterizează iradierea, puterea și viteza de tăiere. Ultimul efect este al interacțiunii dintre viteză și grosime. Acesta este nesemnificativ în raport cu valorile celorlalte efecte. Este singurul efect cu semn negativ care arată scăderea debitului de prelucrare. Acest lucru se datorează efectului interacțiunii dintre viteză și grosime de o scădere a lățimii medii a tăieturii. Efectele prezentate nu au semnificație statistică.

Acestea conțin în principal factorii care controlează iradierea și interacțiunile dintre aceștia. Astfel, se arată un echilibru între factorii care controlează iradierea în ceea ce privește efectul asupra debitului prelucrării la îndepărtarea materialului.

Comparația între diagramele Pareto pentru debitul prelucrării  $Q_p$  arată că pentru experimentul E1F efectul principal îl are puterea, contrar cu experimentul din lucrarea [Yung, 2007], unde pe un material compozit din aceeași clasă, prelucrat cu același tip de laser, efectul principal este frecvența de pulsare.

Puterea și interacțiunea dintre putere și viteza de tăiere au efectele cele mai ridicate. Pentru experimentul E2F grosimea materialului are primul efect în creșterea debitului prelucrării. Se arată astfel că prin condițiile de iradiere utilizate aportul energetic este oarecum în exces și astfel la prelucrare se poate crește ușor grosimea materialului.

În fig. 4.18 suprafața de răspuns prezintă variația debitului de prelucrare cu viteza și puterea. Variația principală o reprezintă creșterea debitului de prelucrare cu puterea. La puteri mici, debitul de prelucrare este independent de viteză. La puteri mari există o puternică creștere a debitului de prelucrare. Se arată astfel că descompunerea termică a materialului este puternic influențată de nivelul puterii.

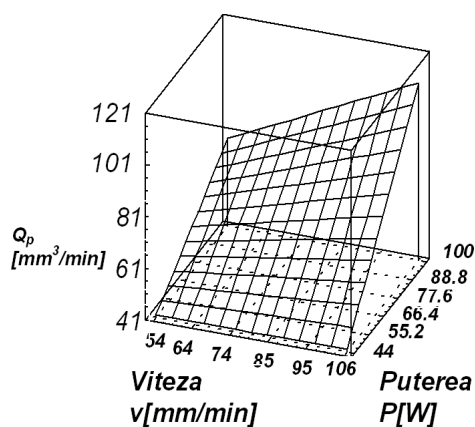


Fig. 4.18 Suprafața de răspuns pentru debitul prelucrării funcție de viteză și putere, experimentul E1F

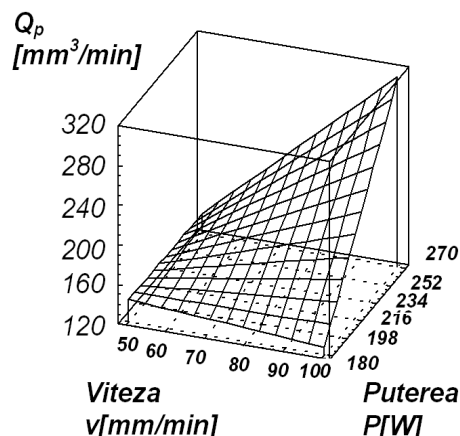


Fig. 4.19 Suprafața de răspuns pentru debitul prelucrării funcție de viteză și putere, experimentul E2F

Suprafața de răspuns din fig. 4.19 arată variația debitului de prelucrare cu puterea și viteza. Ca tendință generală de variație debitul prelucrării crește atât cu puterea cât și cu viteza de tăiere. La puteri mici există o inversie a acestei tendințe, apare o ușoară scădere a debitului de prelucrare cu viteza. Aceasta este provocată de fapt de scăderea lățimii medii a tăieturii. Valorile minime ale vitezei reduc dependența debitului de prelucrare de viteză. Valorile maxime ale debitului de prelucrare se obțin pentru valori maxime ale vitezei de tăiere și valori maxime ale puterii. Acest rezultat este important din punct de vedere tehnologic.

Comparația între suprafețele de răspuns pentru variația debitului prelucrării cu puterea și cu viteza de tăiere din fig. 4.18 și 4.19. arată că pe domeniul experimental debitul prelucrării crește cu puterea. Deși au fost realizate în condiții diferite cele două experimente, la viteză de tăiere ridicată se obține același tip de creștere cu puterea.

#### 4.2.2.3. Funcții obiectiv integratoare: Energia specifică de tăiere

Tehnologiile de procesare laser a materialelor sunt, prin definiție, puternic energofage. Există cel puțin două cauze care generează această situație. Pe de o parte, randamentul energetic scăzut al surselor laser care emit în infraroșu mijlociu (laseri CO<sub>2</sub>) și apropiat (laseri Nd:YAG) și acoperă majoritatea aplicațiilor industriale ale laserilor. Pe de altă parte, rolul determinant al fenomenelor termice, inclusiv transformări de stare de agregare (topire, vaporizare, sublimare, descompunere termo-chimică etc.), desfășurate la temperaturi ridicate, în mecanismele de prelevare a materialului supus iradierii laser [Nichici, 2004].

În acest context, energia specifică de tăiere laser  $E_{sp}$  reprezintă, probabil, cea mai importantă funcție obiectiv a prezentei cercetări doctorale. Afirmția este cu atât mai valabilă, cu cât, în perioada actuală, caracteristicile energetice și ecologice ale tehnologiilor industriale devin decisive în dezvoltarea de noi aplicații.

Modelele matematice polinomiale corespunzătoare energiei specifice de taiere  $E_{sp}$ , în reprezentare codificată sunt reproduse în tabelul 4.8.

Tabelul 4.8. Modelul matematic pentru  $E_{sp}$  [J/mm<sup>3</sup>]

Experiment	Energia specifică de tăiere $E_{sp}$ [J/mm <sup>3</sup> ]
E1F	$E_{sp} = 68.661 - 6.76625 A - 4.08875 B + 3.44625 C$ $- 0.01625 AB - 5.83125 AC - 2.66875 BC$ $R^2 = 0.61 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0$
E2F	$E_{sp} = 97.5034 - 24.5486 D + 9.39038 E - 38.0941 F$ $- 13.9046 DE + 25.2714 DF - 15.0396 EF$ $R^2 = 0,97 \quad R^2(\text{adj. ford.f.}) = 0,92$

$R^2$  - coeficient de corelație,  $R^2(\text{adj. ford.f.})$  = coeficient de corelație corectat pentru diferență

Se poate observa că la ambele modele, datorită semnului negativ al coeficienților respectivi, energia specifică scade cu viteza de tăiere, frecvența pulsurilor, și grosimea materialului, în timp ce datorită semnului pozitiv, energia specifică în cazul ambelor modele crește cu puterea, fenomen care se poate verifica și în diagramele Pareto standardizate corespunzătoare energiei  $E_{sp}$  din fig. 4.20 și 4.21. Obținerea de valori minime pentru energie specifică este un obiectiv principal pentru optimizarea procesului de tăiere laser.

În fig. 4.20 este prezentată diagrama Pareto pentru energia specifică. Primul efect este al vitezei de tăiere, urmat de cel al interacțiunii între viteză și putere. Niciunul din efectele prezentate nu are semnificație statistică. Timpul de interacțiune între radiația laser și material are rolul de scădere a energiei specifice atât în cazul creșterii prin frecvență cât și în cazul scăderii prin viteză.

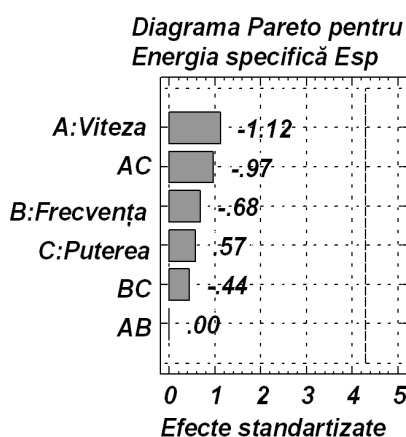


Fig. 4.20 Diagrama Pareto pentru energia specifică, experimentul E1F

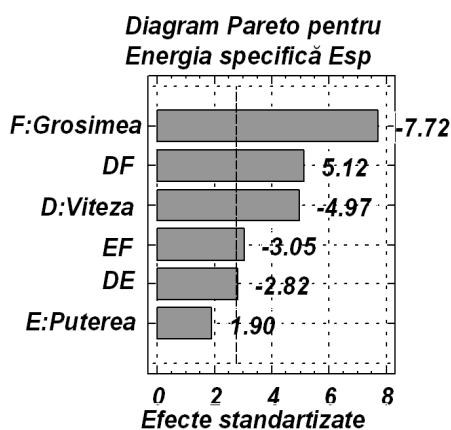


Fig. 4.21 Diagrama Pareto pentru energia specifică, experimentul E2F

Scăderea eficienței specifice are la bază două situații distincte de influență asupra procesului, una datorită intensității, iar alta datorată timpului de interacțiune ridicat. Lipsa interacțiunii AB arată că procesul se află practic în una din cele două situații, timpul de interacțiune scăzut este asociat cu favorizarea efectului puterii. Astfel, timpul de interacțiune nu poate avea un efect neutru asupra eficienței de îndepărtare a materialului. Singurul efect pozitiv este cel al puterii. Se arată astfel că puterea excesivă poate avea un efect defavorabil crescând energia specifică.

Energia specifică arată cantitatea de energie utilizată în procesul de prelucrare pentru a îndepărta  $1 \text{ mm}^3$  de material. Ca și obiectiv tehnologic, se formulează obținerea de valori minime pentru energia specifică.

În fig. 4.21 se prezintă diagrama Pareto pentru energia specifică. Toate efectele, mai puțin ultimul, au semnificație statistică. Primul efect este cel al grosimii materialului urmat de cel al interacțiunii între grosimea materialului și viteza de tăiere. Apoi urmează efectul vitezei de tăiere. Următoarele efecte sunt cele ale interacțiunilor puterii, iar ultimul este cel al puterii. Se remarcă, că energia specifică

scade cu grosimea materialului și crește cu interacțiunea dintre viteza de tăiere și grosimea materialului. Se remarcă faptul că efectul vitezei de tăiere este acela de scădere a energiei specifice. Prin aceasta se arată că eficiența procesului de tăiere crește odată cu creșterea vitezei de tăiere.

Creșterea puterii are, considerând efectul său și al interacțiunilor la care participă, un efect de scădere a energiei specifice și prin aceasta de creștere a eficienței la prelucrarea materialului. Efectul puterii în acest sens este mai mic decât cel al vitezei de tăiere însă este comparabil cu acesta. Scăderea puternică a energiei specifice cu grosimea materialului arată că dacă procesul de tăiere are loc se poate crește într-o anumită măsură grosimea materialului fără a fi nevoie de un nivel superior al iradierii prin creșterea puterii sau scăderea vitezei de tăiere.

Comparând fig. 4.20 și 4.21 care prezintă diagramele Pareto pentru energia specifică se observă că pentru experimentul E1F primele efecte se datorează vitezei de tăiere. Energia specifică scade cu creșterea vitezei de tăiere, așa cum se poate observa și în lucrarea [Pan, 1998], cu diferența că, s-a lucrat în regim continuu. Acesta este principalul criteriu pentru optimizarea procesului de tăiere laser. Pentru experimentul E2F s-a observat că viteza de tăiere și grosimea materialului scad energia specifică. Prin aceasta se arată ca și pentru debitul prelucrării că există posibilitatea creșterii grosimii materialului în aceleași condiții de iradiere.

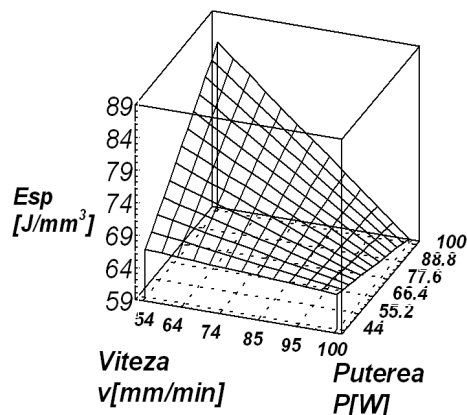


Fig. 4.22 Suprafața de răspuns pentru energia specifică funcție de viteză și putere, experimentul E1F

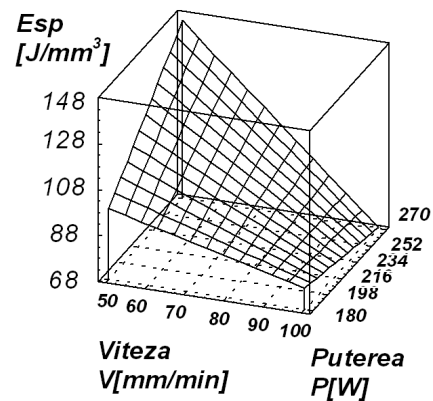


Fig. 4.23 Suprafața de răspuns pentru energia specifică funcție de viteză și putere, experimentul E2F

Suprafața de răspuns din fig. 4.22 arată variația energiei specifice în funcție de viteza de tăiere și de putere. Energia specifică scade cu viteza de tăiere pe tot domeniul experimental. La viteze de tăiere mici energia specifică crește puternic cu puterea. La viteza de tăiere maximă variația se inversează și apare o scădere a energiei specifice cu puterea. Valori minime ale energiei specifice se obțin pentru viteza de tăiere maximă și puterea maximă. Se arată astfel că pentru a fi eficient procesul de tăiere este necesar ca arderea/descompunerea termică să fie puternică și localizată, fără a avea timp să se extindă în material. Această comportare



reprezintă un rezultat important, astfel se arată rolul important al intensității ridicate a fasciculului laser pentru a obține un proces de tăiere eficient.

Suprafața de răspuns din fig. 4.23 arată variația energiei specifice în funcție de viteză și în funcție de putere. Pe domeniul experimental există o scădere a energiei specifice cu viteza de tăiere. Această scădere este mai pronunțată la puteri mari decât la puteri mici. La viteze de tăiere mici puterea crește energia specifică. La viteze de tăiere mari puterea produce o ușoară scădere a energiei specifice. Valori minime pe domeniul experimental ale energiei specifice se obțin prin creșterea vitezei de tăiere aproape independent de putere. Din punct de vedere tehnologic se recomandă valori ridicate ale vitezei de tăiere pentru a crește eficiența procesului de tăiere.

Suprafețele de răspuns din fig. 4.22 și 4.23 arată că, pe domeniul experimental există o scădere a energiei specifice cu viteza de tăiere și cu puterea. Scăderea cu viteza de tăiere este mai puternică la puteri mari. Astfel, se arată că la puteri mari, prin creșteri mici ale vitezei de tăiere, se poate obține o creștere importantă a eficienței utilizării energiei transmise către material.

### 4.2.3. Experimente clasice

Așa cum s-a preconizat la începutul capitolului 4 (p. 4.2.1.1.), secțiunea 4.2.3. este consacrată descrierii și examinării elementelor morfologice tip, corespunzătoare funcțiilor obiectiv definite anterior (figura 4.3.), obținute în cadrul planurilor de experimentare clasice. Prezentarea va începe cu experimentele clasice finalizate cu penetrarea completă a materialului supus tăierii (p. 4.2.3.1.) și se va încheia cu experimentele în care penetrarea materialului supus tăierii a fost incompletă (p. 4.2.3.2.). Un paragraf suplimentar (p. 4.2.3.3.) va fi dedicat aprofundării fenomenologice a situațiilor în care procesul de tăiere nu a fost realizat integral.

Trecerea în revistă a elementelor morfologice informaționale va respecta succesiunea indicată în fig. 4.3. și anume: modele matematice polinomiale, diagrame Pareto, suprafețe de răspuns și reprezentări grafice clasice.

#### 4.2.3.1. Experimente cu penetrarea completă a materialului supus tăierii

##### 4.2.3.1.1. Funcții obiectiv primare: Lățimea tăieturii

Analiza variațiilor după planurile experimentale clasice a considerat funcțiile obiectiv anterior analizate pentru planurile experimentale factoriale. Se va prezenta analiza pentru fiecare grosime în parte, în ordine crescătoare grosimii materialului. Pentru planurile experimentale care au avut 5 puncte experimentale se vor prezenta modele matematice folosind funcții de regresie.

Pentru **grosimea 1.5 mm** se prezintă două planuri experimentale cu 5 puncte experimentale fiecare. Fig. 4.24 prezintă variația lățimii tăieturii cu puterea pentru **grosimea de 1,5 mm**, planul experimental 1.1. (tab. 2.9). Se observă că pe

domeniul experimental, lăţimea tăieturii creşte. Creşterea este de tip liniar pentru toate cele trei lăţimi. Se observă că, la puterea de 160 W apare o tăietură mai lată la partea inferioară, celelalte tăieturi fiind mai late la partea superioară.

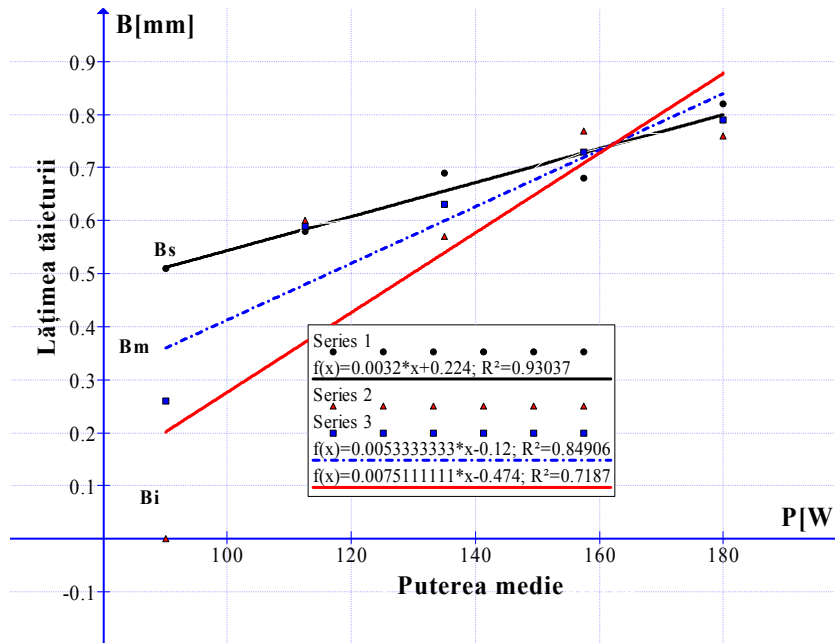


Fig. 4.24 Variaţia lăţimii tăieturii cu puterea medie la viteza de tăiere const.  $v = 200$  mm/min, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5$  ms, frecvenţa de pulsare  $f = 30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Se arată astfel că, pentru această placă subţire arderea la partea inferioară reprezintă o situaţie particulară. Se observă că, odată cu creşterea puterii scade diferenţa dintre lăţimea tăieturii la partea superioară şi lăţimea tăieturii la partea inferioară. Se arată astfel efectul puterii de a asigura penetrarea materialului. Lăţimea tăieturii la partea superioară arată o creştere de 2 - 4 ori în comparaţie cu diametrul fasciculului laser în pata focală.

Funcţiile de regresie utilizate prezintă coeficienţi de corelaţie ridicaţi. Variaţia prezentată arată că, odată cu creşterea puterii, fenomenele termice care au loc la frontul de tăiere nu prezintă variaţii în interiorul materialului, ceea ce conduce la apropierea valorilor între lăţimea tăieturii la partea superioară şi lăţimea tăieturii la partea inferioară. Se observă că lăţimea maximă a tăieturii din figură pentru planul experimental analizat are ca valoare jumătate din grosimea materialului.

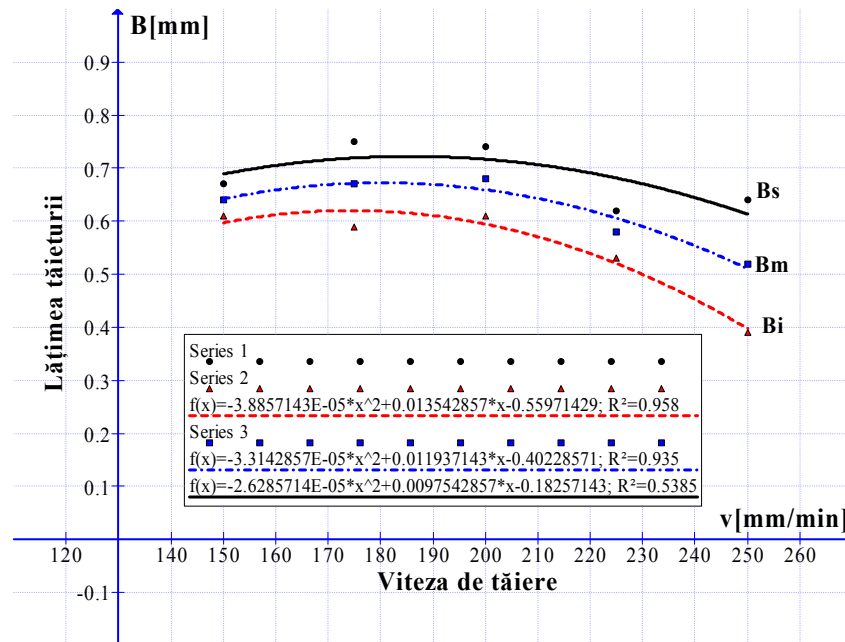


Fig 4.25 Variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere la puterea medie const.  $P=135$  W, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$ ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.25 arată variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,5 mm**, planul experimental 1.2 (tabelul 2.9). Se observă că pe domeniul experimental studiat există o scădere de tip pătratic a lățimii tăieturii cu viteza de tăiere, scădere mică pe domeniul experimental. Toate tăieturile sunt mai late la partea superioară decât la partea inferioară. La viteze de tăiere mici și medii diferența între lățimea tăieturii la partea superioară și cea la partea inferioară se menține relativ constantă. La viteze de tăiere mari diferența între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea la partea inferioară crește. Scăderea lățimii la partea inferioară este un semn că odată cu creșterea vitezei de tăiere se va ajunge la situația în care tăietura nu va penetra materialul. La viteza de tăiere mare există o ușoară creștere a lățimii superioare a tăieturii. Aceasta este modelată de funcția de regresie de gradul 3. Se poate observa că, dacă se exclude încercarea la viteza cea mai mare se obțin rezultate apropiate pentru lățimea tăieturii pe domeniul experimental. Pentru tot planul experimental prezentat se poate spune că lățimea tăieturii este între 0,6-0,7 mm.

Fig. 4.26 prezintă variația lățimii tăieturii cu puterea pentru **grosimea de 1,7 mm**, planul experimental 2.1 (tabelul 2.10). Se observă că pe domeniul experimental există o creștere liniară a lățimii tăieturii cu puterea medie. Se observă că la putere de 160-170 W există un domeniu experimental favorabil pentru obținerea tăieturilor drepte. Creșterea puterii apropie valorile între lățimea tăieturii la partea inferioară și lățimea tăieturii la partea superioară. La puteri mari se obțin tăieturi mai late la partea inferioară. Se arată astfel că, puterea ridicată favorizează

arderea materialului în profunzime și prin aceasta, crește lățimea tăieturii la partea inferioară.

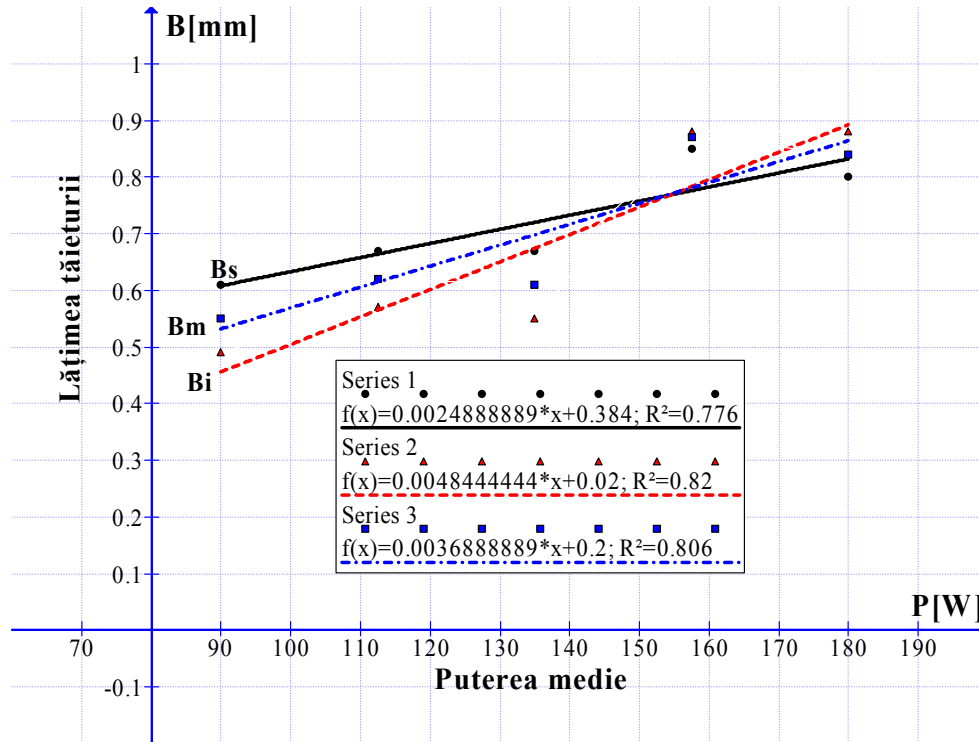


Fig. 4.26 Variația lățimii tăieturii cu puterea medie la viteza  $v=100$  mm/min pentru, grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

În comparație cu grosimea de 1,5mm, pentru aceleași puteri, dar prin reducerea vitezei de tăiere s-a obținut o apropiere între lățimea tăieturii la partea superioară și cea la partea inferioară și creșterea valorilor pentru lățimea tăieturii la partea inferioară.

Fig. 4.27 prezintă variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,7 mm**, planul experimental 2.2. (tabelul 2.10). Se observă că la viteze de tăiere mici, lățimea tăieturii la partea inferioară este mai mare decât cea la partea superioară. Această variație se explică prin valori ridicate ale timpului de interacțiune între radiația laser și material.

La viteze de tăiere mari situația se inversează, efectele la suprafață fiind mai puternice. La ambele capete ale domeniului experimental analizat există valori mari între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. La centrul domeniului experimental valorile sunt apropiate cu o zonă favorabilă pentru obținerea unor tăieturi drepte la viteza de 100mm/min.

Pe domeniul experimental analizat există o ușoară scădere a lățimii tăieturii. Această variație este mai mică decât cea între lățimea tăieturii la partea superioară și cea la partea inferioară. Astfel că, pe domeniul experimental se poate considera o lățime a tăieturii aproape constantă, între 0,7-0,8 mm.

În continuare în ordine cronologică ar trebui prezentată variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere și puterea pentru grosimea de 3,4 mm, materialul cu numărul 3 din experimentul clasic, însă, neexistând pătrundere, autorul a ales ca tratarea acestuia să aibe loc în paragraful 4.2.3.2. denumit: *Experimente cu penetrarea incompletă a materialului supus tăierii.*

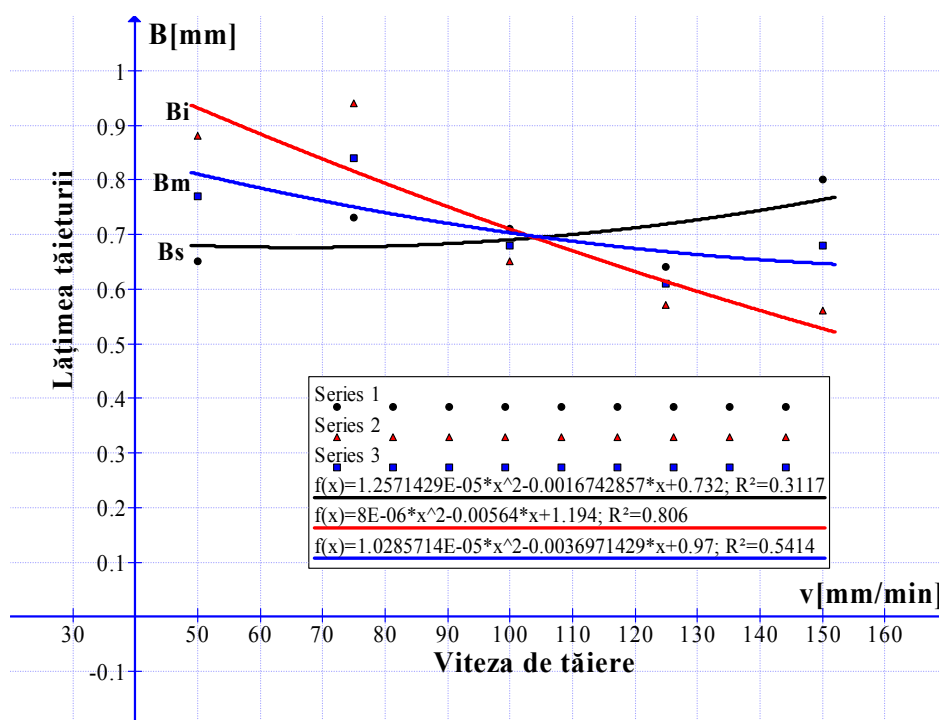


Fig. 4.27 Variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere la puterea  $P=135W$ , pentru grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p=1.5ms$ , frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.28 prezintă variația lățimii tăieturii cu puterea medie pentru **grosimea de 4,6 mm**, planul experimental 6.1. (tabelul 2.14). Pe domeniul experimental se observă o scădere a lățimii superioare a tăieturii  $B_s$  și o creștere a lățimii tăieturii inferioare  $B_i$  cu creșterea puterii. Aceasta arată că prin creșterea puterii se favorizează arderea materialului în profunzime. Lățimea medie  $B_m$  nu prezintă variații mari pe domeniul experimental. La puteri mici tăieturile sunt mai late la partea superioară iar la puteri mari tăieturile sunt mai late la partea inferioară.

Între puterile de 220 W și 240 W diferența între lățimea tăieturii la partea superioară și cea la partea inferioară scade. Există posibilitatea ca în apropierea puterii de 230 W să se obțină tăieturi perfect drepte. Creșterea puterii conduce la

creșterea diferențelor între lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară a piesei.

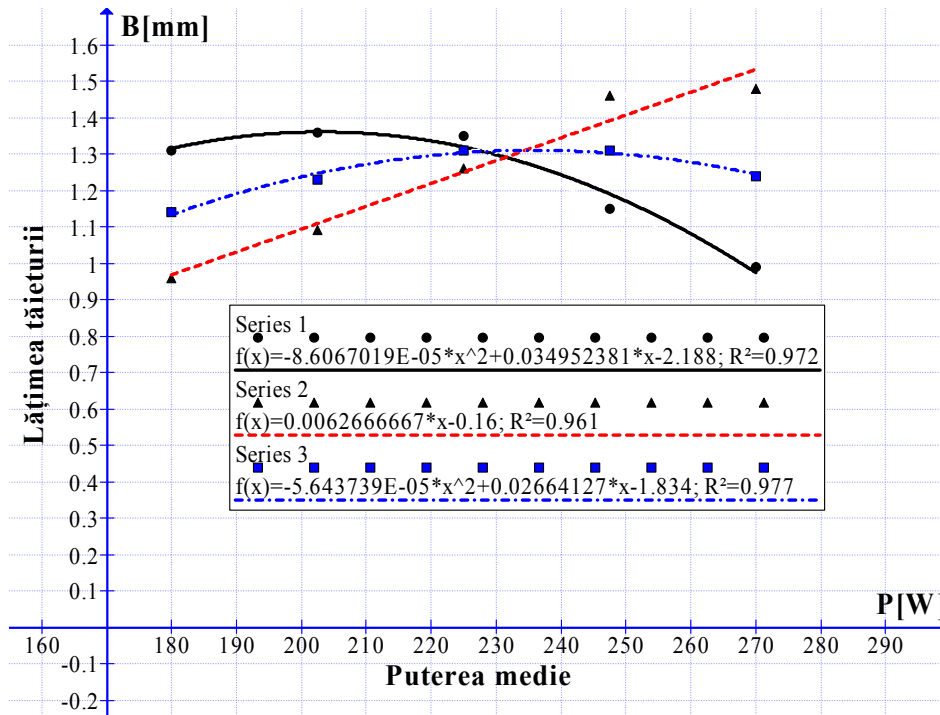


Fig. 4.28 Variația lățimii tăieturii cu puterea la viteza de tăiere  $v=100\text{mm/min}$  pentru grosimea  $4.6\text{ mm}$ , durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Fig. 4.29 prezintă variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 4,6 mm**, planul experimental 6.2. (tabelul 2.14). Lățimea tăieturii la partea superioară prezintă o creștere de tip liniar pe domeniul experimental. Lățimea tăieturii la partea inferioară prezintă o scădere logaritmică pe domeniul experimental. Scăderea are ca rezultat obținerea de tăieturi nepenetrante. Pe domeniul experimental viteza de tăiere este un parametru critic, deoarece de acesta depinde realizarea procesului de tăiere.

Pentru lățimea medie se obține o variație dată de funcția de regresie care prezintă un maxim și un minim asociat cu situația în care tăietura nu este penetrată. Se observă că la viteze de tăiere mici tăieturile sunt mai late la partea inferioară după care odată cu creșterea vitezei lățimea tăieturii la partea inferioară scade. În apropierea vitezei de  $70\text{ mm/min}$  se obțin condiții favorabile pentru obținerea unor tăieturi drepte. Se observă că odată cu creșterea vitezei de tăiere crește și diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară și lățimea tăieturii la partea inferioară. La viteze de tăiere mari tăieturile sunt mai late la partea superioară decât la partea inferioară.

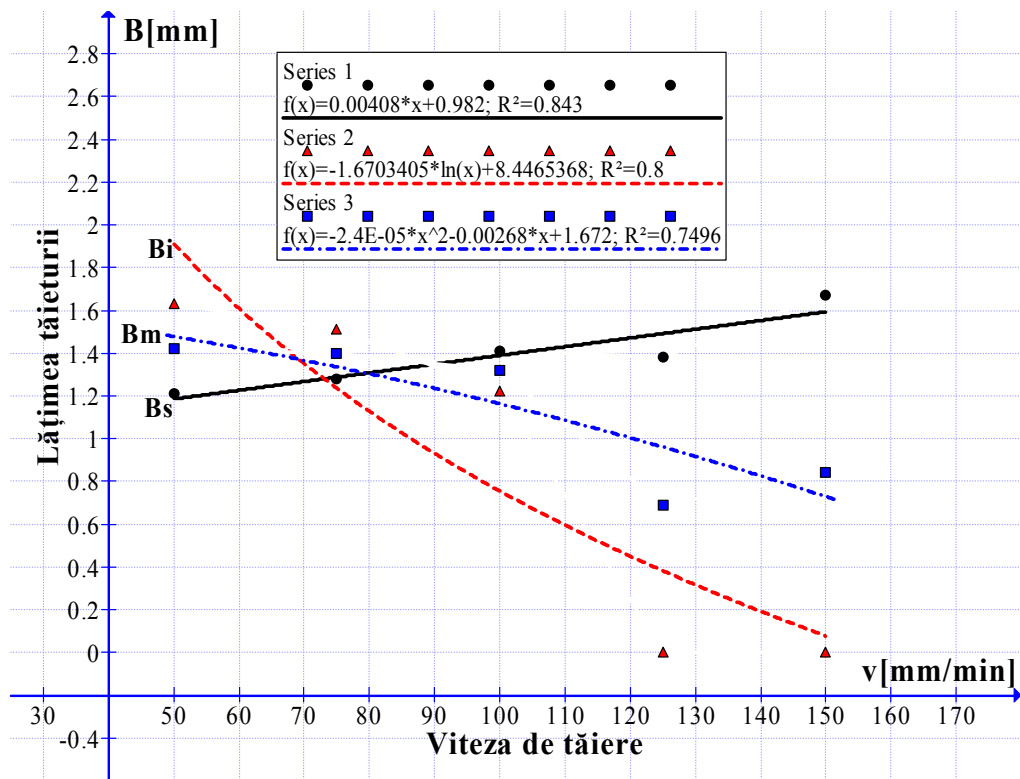


Fig. 4.29 Variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere la puterea  $P=225W$  pentru grosimea  $4.6\text{ mm}$ , durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Deși nu au constituit obiect prioritar al cercetării doctorale, este important pentru definirea completă a geometriei tăieturii să se aiba în vedere și inclinarea, respectiv abaterea de la paralelism a pereților tăieturii. (Anexa 4)

#### 4.2.3.1.2. Funcții obiectiv compuse: Debitul prelucrării

Debitul prelucrării a fost denumit funcție obiectiv compusă, deoarece calculul ei se bazează pe funcțiile obiectiv primare, și anume, lățimea medie a tăieturii, alături de viteză care, așa cum s-a observat pe parcursul lucrării, este un important factor de influență.

Fig. 4.30 prezintă variația debitului prelucrării cu puterea medie pentru **grosimea de 1,5 mm**, planul experimental 1.1. (tabelul 2.9). Pe domeniul experimental se observă o creștere a debitului prelucrării cu puterea. Creșterea este de tip liniar. Se observă că pe domeniul experimental există o creștere de 3 ori a debitului de prelucrare. Creșterea debitului de prelucrare are la bază creșterea lățimii tăieturii cu puterea. Pentru grosimea de 1,5 mm (placa considerată subțire), creșterea lățimii tăieturii nu este recomandată deoarece odată cu aceasta crește și

afectarea termică a materialului. În plus, tăieturile prea late nu se justifică pentru plăci de material subțiri.

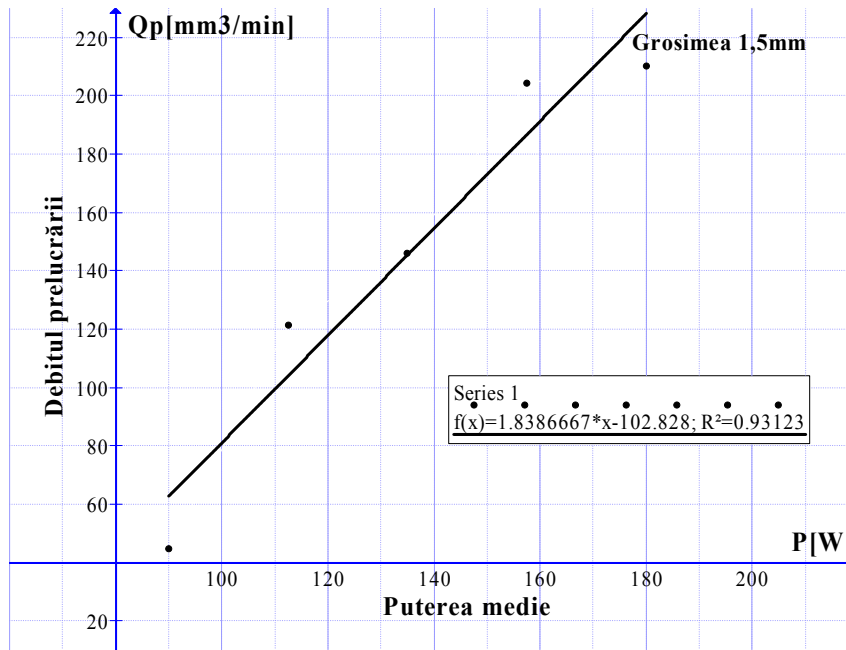


Fig. 4.30 Variația debitului prelucrării cu puterea medie la viteza de tăiere  $v=200$  mm/min, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.31 prezintă variația debitului de prelucrare cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,5 mm**, planul experimental 1.2. (tabelul 2.9). Se observă prezența unui maxim la centrul domeniului experimental, la viteza de 200 mm/min. Partea de creștere a debitului de prelucrare (de la începutul domeniului experimental) arată un domeniu în care creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material (prin creșterea vitezei de tăiere) coincide cu o situație în care are loc o creștere a cuplajului energetic între radiația laser și material. Scăderea debitului de prelucrare la sfârșitul domeniului experimental este asociată direct cu scăderea timpului de interacțiune între radiația laser și material. Se observă că această scădere este foarte puternică la sfârșitul domeniului experimental.

Fig. 4.32 prezintă variația debitului prelucrării pentru **grosimea de 1,7 mm** cu puterea, planul experimental 2.1. (tabelul 2.10). Se observă o creștere liniară a debitului prelucrării cu puterea medie. Se arată astfel că energia furnizată de fasciculul laser este utilizată la obținerea tăieturii.



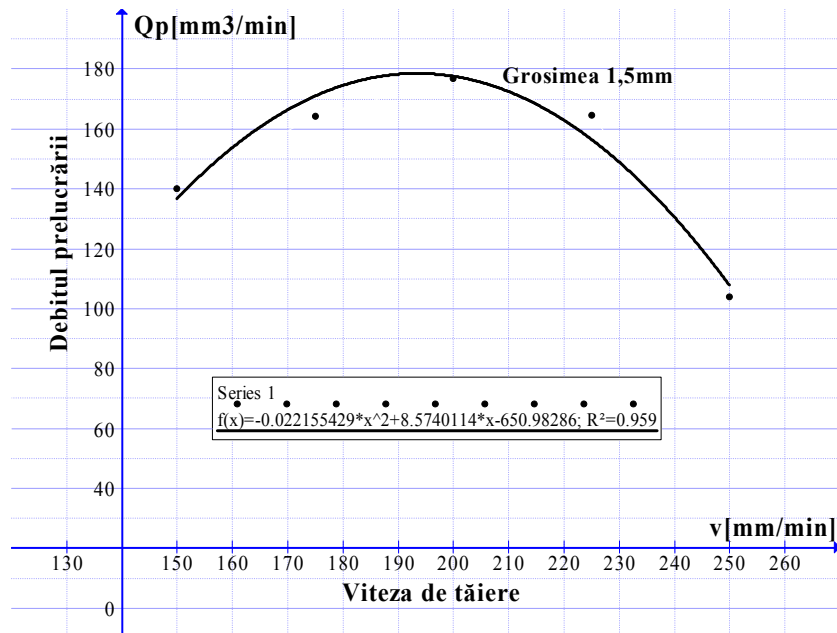


Fig. 4.31 Variația debitului de prelucrare cu viteza de tăiere la puterea medie  $P = 135$  W grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f = 30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

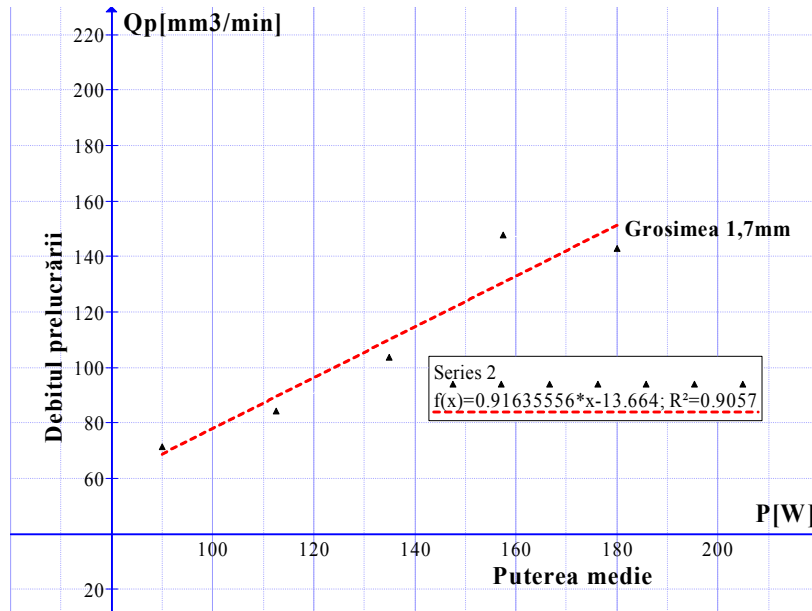


Fig. 4.32 Variația debitului prelucrării cu puterea medie la viteza  $v = 100$  mm/min pentru grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f = 30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.33 prezintă variația debitului prelucrării cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,7 mm**, planul experimental 2.2. (tabelul 2.10). Se observă că pe domeniul experimental există o creștere a debitului prelucrării. Aceasta este modelată printr-o funcție de tip logaritmă. Se arată astfel că odată cu creșterea vitezei de tăiere s-a realizat utilizarea eficientă a energiei pentru realizarea tăieturii. Se observă o scădere a debitului prelucrării la valoarea vitezei de tăiere de 125 mm/min. Această valoare a vitezei de tăiere este defavorabilă pentru procesul de tăiere.

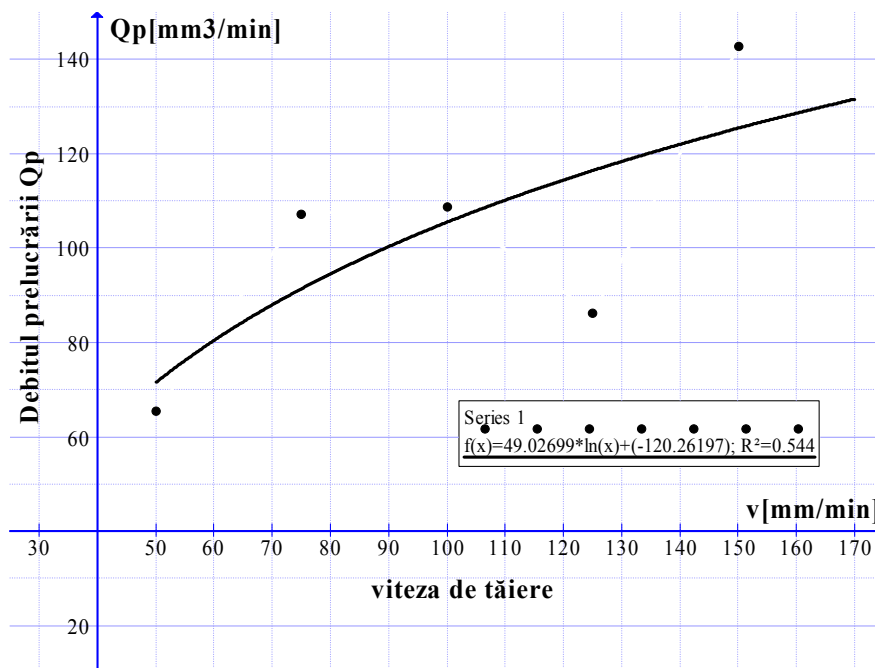


Fig. 4.33 Variația debitului prelucrării cu viteza de tăiere la puterea  $P = 135\text{W}$ , pentru grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f = 30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.34 prezintă variația debitului prelucrării cu puterea medie, planul experimental 6.1. (tabelul 2.14). Se observă că, pe domeniul experimental studiat, se obține o creștere a debitului de prelucrare cu puterea. Se observă că la puteri mari se obține creșterea mai lentă care duce către un palier constant (sau un maxim al funcției de regresie prezentate). Se arată astfel că, prin creșterea puterii, debitul de prelucrare nu poate fi crescut oricât. Se arată că utilizarea unor valori ridicate pentru putere este utilă pentru procesul de tăiere.

Fig. 4.35 prezintă variația debitului de prelucrare cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 4,6 mm**, planul experimental 6.2. (tabelul 2.14). Variația debitului de prelucrare reproduce tipul de variație pentru lățimea medie a tăieturii. Se obține astfel un maxim puternic în apropierea vitezei de 80 mm/min după care urmează o scădere terminată cu un minim asociat cu cazul în care se obțin tăieturi nepenetrante.

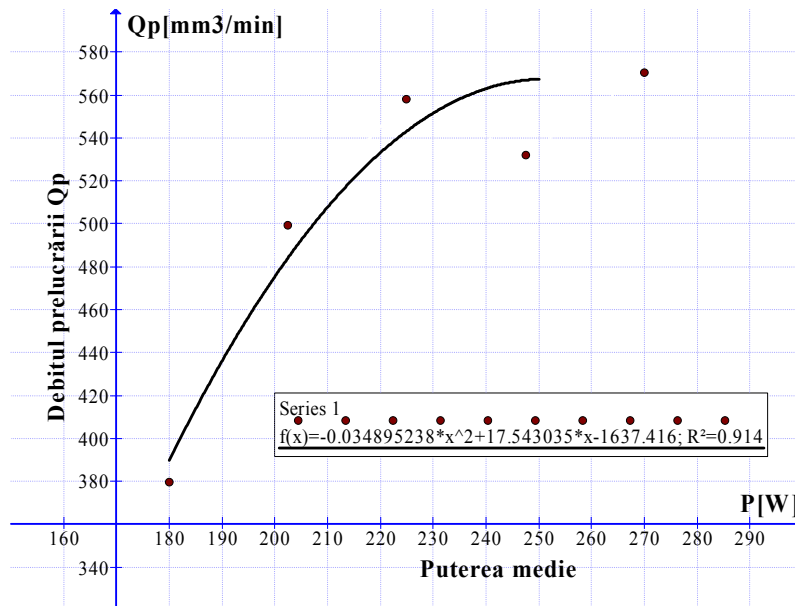


Fig. 4.34 Variația debitului prelucrării cu puterea la viteza de tăiere  $v=100\text{mm/min}$  pentru grosimea  $4.6\text{ mm}$ , durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

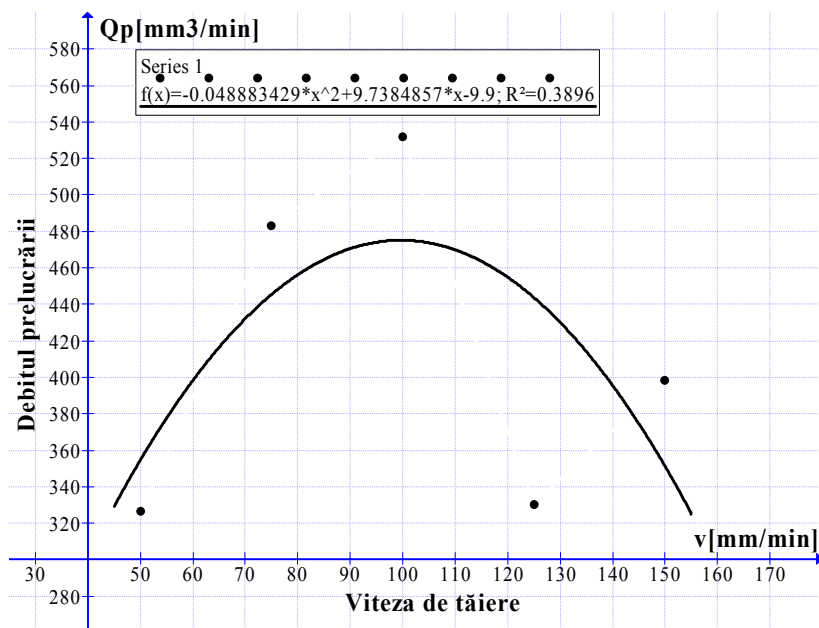


Fig. 4.35 Variația debitului prelucrării cu viteza de tăiere la puterea  $P=225\text{W}$  pentru grosimea  $4.6\text{ mm}$ , durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Creșterea care se observă după minim arată că tendința de a folosi eficient energia transmisă către piesă la viteze mari se menține, numai că în acest caz cresc dimensiunile șanțului produs. La viteze de tăiere mici se realizează tăietura, debitul prelucrării este mic ceea ce arată folosirea ineficientă a energiei la îndepărtarea materialului. În această situație debitul prelucrării este mai mic decât pentru situația în care se obțin tăieturi nepenetrante.

#### 4.2.3.1.3. Funcții obiectiv integratoare: Energia specifică de tăiere

Energia specifică de tăiere a fost denumită funcție obiectiv integratoare, deoarece calculul ei se bazează pe o funcție compusă și pe un factor de influență.

Fig. 4.36 arată variația energiei specifice cu puterea de tăiere pentru planul experimental 1.1. (tabelul 2.9). Se observă o scădere a energiei specifice odată cu creșterea puterii. După cum s-a arătat anterior valorile minime pentru energia specifică reprezintă valori optime. Funcția de regresie prezentată arată un minim local la puterea de 155 W, aceasta ar prezenta o valoare optimă. Scăderea energiei specifice cu puterea nu reprezintă o situație tipică pentru procesele de prelucrare laser, de obicei creșterea puterii crește consumul energetic pentru a îndepărta sau transforma unitatea de material.

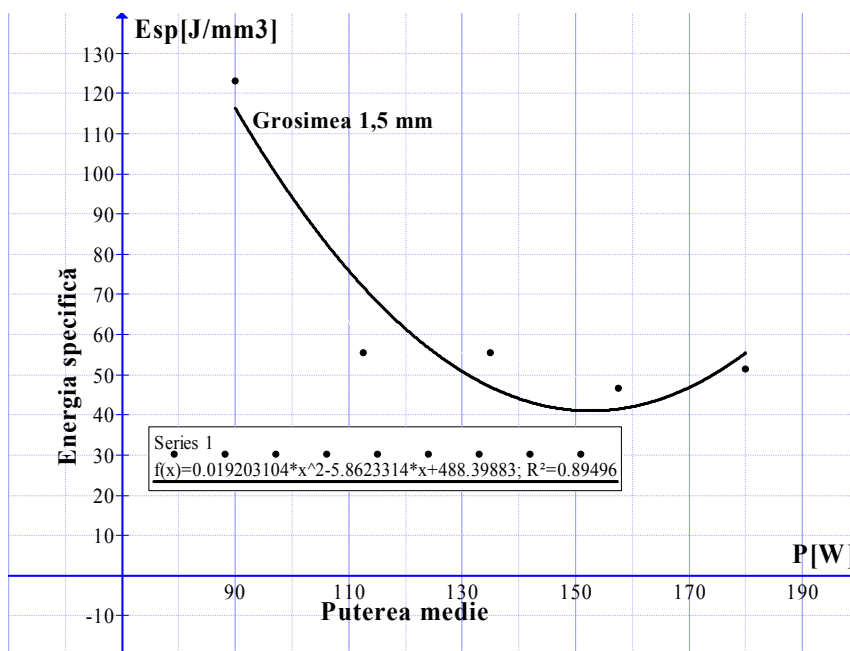


Fig. 4.36. Variația energiei specifice cu puterea medie la viteza de tăiere  $v=200$  mm/min, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$ ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Astfel se impune interpretarea datelor prezentate în figura 4.36. dintr-o altă perspectivă. Se observă că, dacă se exclude prima valoare la putere mică (care este sursa descreșterii), restul valorilor sunt concentrate între 45-55 J/mm<sup>3</sup>. Astfel, interpretarea convenită în cazul de față este că pe domeniul experimental energia specifică este constantă cu variația puterii. Se arată astfel că fenomenele fizice care stau la baza eroziunii au un caracter stabil relativ la puterile folosite în experiment.

Fig. 4.37 prezintă variația energiei specifice cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,5mm**, planul experimental 1.2. (tabelul 2.9). Variația prezentată este inversă celei pentru debitul de prelucrare, este vorba despre o scădere urmată de o creștere. Situația tehnologic favorabilă este prezentată prin minimumul de la viteza de 200 mm/min. La viteze de tăiere mici există pierderi de energie prin conducție în material datorită timpului de interacțiune între radiația laser și material, relativ mare. Creșterea care se remarcă la sfârșitul domeniului experimental studiat se datorează unei cantități insuficiente de material erodat. Se remarcă faptul că majoritatea valorilor pentru energia specifică sunt în jurul valorii de 50 J/mm<sup>3</sup>.

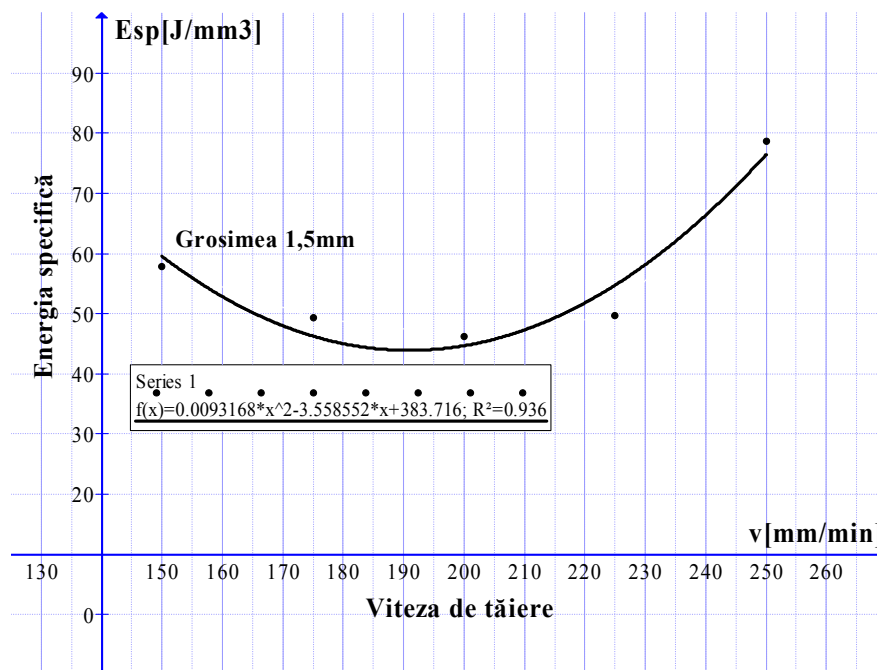


Fig. 4.37 Variația energiei specifice cu viteza de tăiere la puterea medie  $P = 135$  W, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f = 30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Fig. 4.38 prezintă variația energiei specifice cu puterea pentru planul experimental 2.1. (tabelul 2.10). Se observă că variația energiei specifice pe domeniul experimental este mică. Astfel, valorile energiei specifice sunt apropiate de valoarea de 70 J/mm<sup>3</sup>. Un minim local se obține la valoarea de 160W. Se arată că nivelul ridicat al puterii este recomandat pentru optimizarea procesului de tăiere.

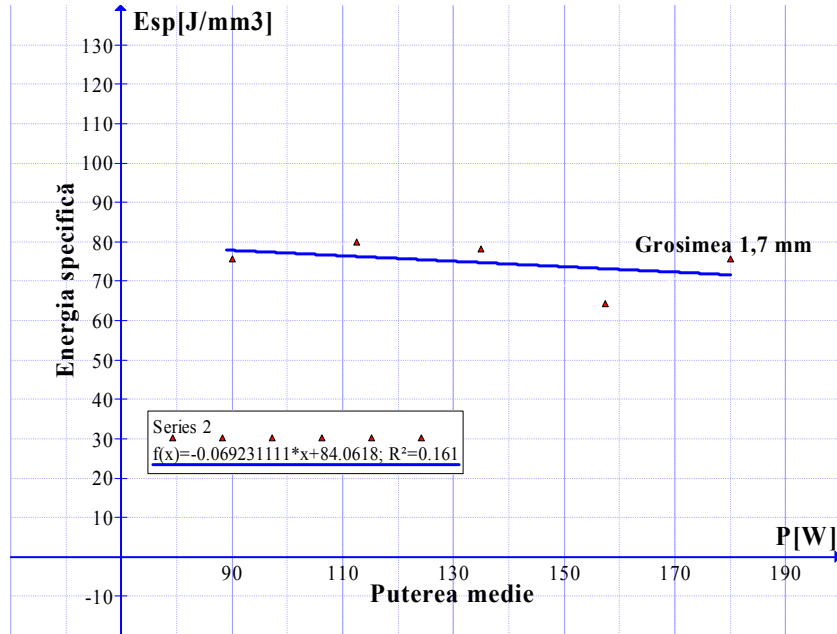


Fig 4.38 Variația energiei specifice cu puterea medie la viteza  $v=100$  mm/min pentru grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$ ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

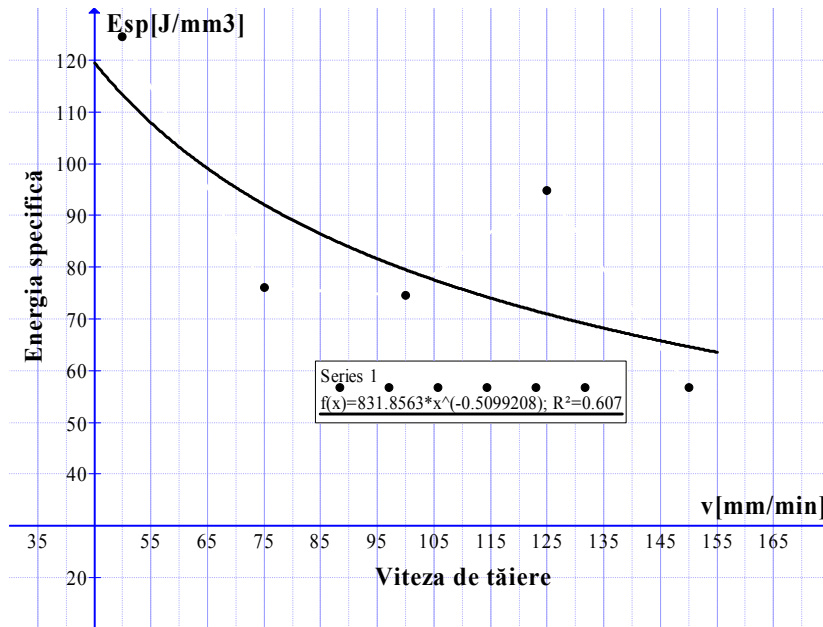


Fig. 4.39 Variația debitului energiei specifice cu viteza de tăiere la puterea  $P=135$ W, pentru grosimea 1.7 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$ ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz

Fig. 4.39 prezintă variația energiei specifice cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 1,7 mm**, planul experimental 2.2. (tabelul 2.10.). Se observă că pe domeniul experimental studiat există o scădere de tip exponențial a energiei specifice cu viteza de tăiere. Astfel, utilizarea energiei date de fasciculul laser la realizarea tăieturii devine mai eficientă odată cu creșterea vitezei de tăiere.

Variația dată pentru energia specifică este inversă celei pentru debitul de prelucrare. La valoarea vitezei de tăiere de 125 mm/min se obține o valoare mai mare pentru energia specifică, lucru care prezintă o situație defavorabilă pentru procesul de tăiere.

Fig. 4.40 prezintă variația energiei specifice cu puterea pentru **grosimea de 4,6 mm**, planul experimental 6.1 (tabelul 2.14). Se remarcă faptul că variația energiei specifice cu puterea este mică în valori absolute pe domeniul experimental. Se poate observa, de asemenea, că valorile pentru energia specifică obținute la grosimea de 4,6 mm sunt mai mici decât cele obținute pentru plăcile anterioare. Se arată astfel că reglarea factorilor astfel încât tăierea să fie realizabilă pe un material mai gros conduce automat la creșterea eficienței la îndepărtarea materialului. Se observă că pe domeniul experimental se obține un minim în apropierea valorii de 200 W pentru putere. Se arată deasemenea că, utilizarea de valori moderate ale puterii relativ la domeniul experimental prezentat este recomandabilă pentru procesul de tăiere.

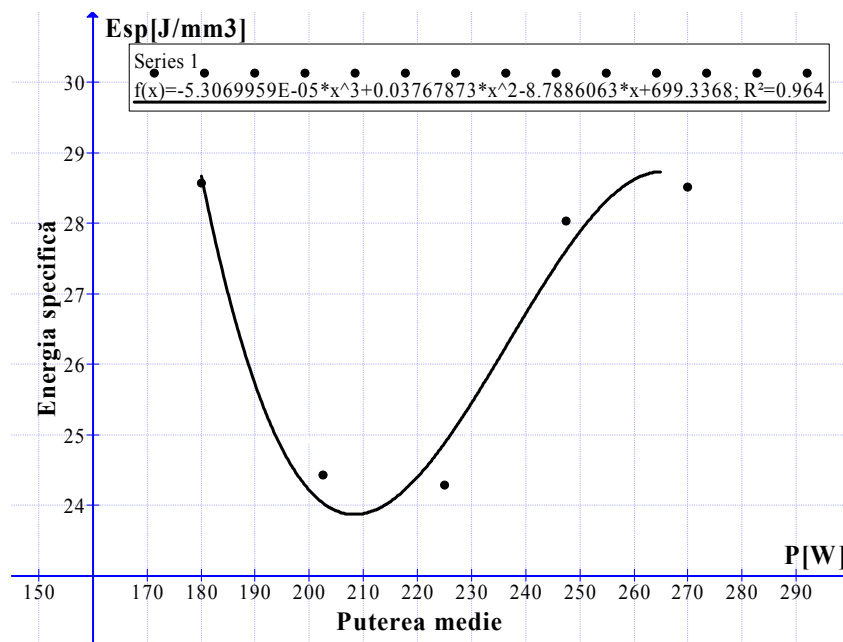


Fig. 4.40 Variația energiei specifice cu puterea la viteza de tăiere  $v=100\text{mm/min}$  pentru grosimea 4.6 mm, durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Fig. 4.41 prezintă variația energiei specifice cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 4,6 mm**, planul experimental 6.2. (tabelul 2.14). Se observă că pe domeniul experimental are loc o scădere a energiei specifice urmată de o creștere a acesteia. Minimul arătat de funcția de regresie în jurul valorii de 80 mm/min arată o situație favorabilă pentru procesul de tăiere.

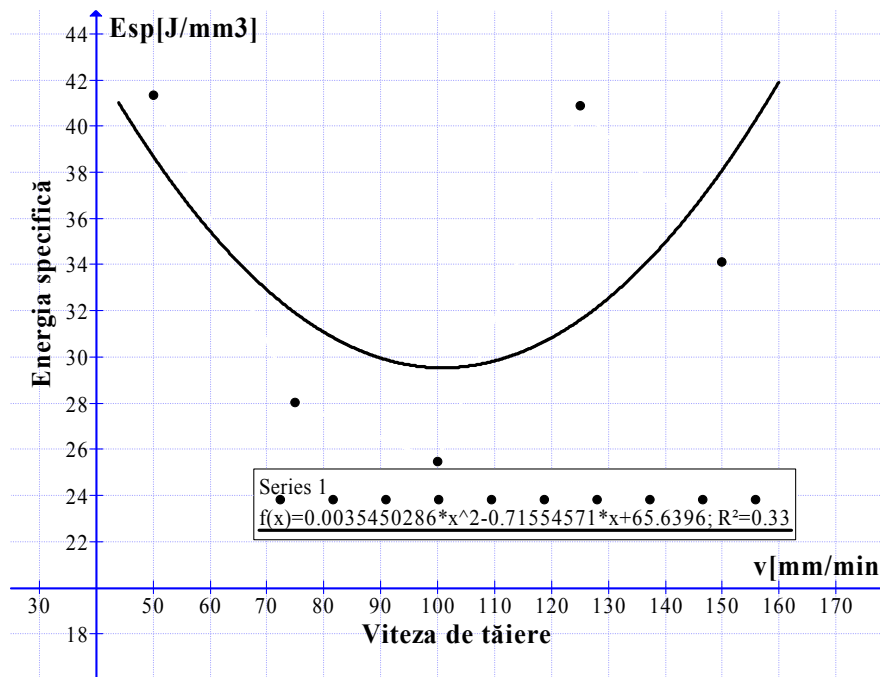


Fig. 4.41 Variația debitului prelucrării cu viteza de tăiere la puterea  $P=225\text{W}$  pentru grosimea 4.6 mm, durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Creșterea valorilor energiei specifice și maximul care urmează sunt asociate cu situația în care tăietura nu penetrează materialul. Valorile obținute pentru energia specifică sunt mai mici decât cele pentru placile anterioare. Variațiile obținute pentru energia specifică sunt mai mari decât cele obținute pentru situația în care s-a variat puterea.

#### 4.2.3.2. Experimente cu penetrarea incompletă a materialului supus tăierii

Pentru **grosimea de 3,4 mm**, tăieturile realizate nu au fost complet penetrate. Pentru acestea s-a măsurat numai lățimea la partea superioară. În aceste situații există tendința de creștere a lățimii tăieturii la partea superioară deoarece evacuarea materialului erodat (vapori, produși de reacție) se realizează la suprafața piesei. Astfel are loc un transfer de căldură prin convecție care mărește lățimea șanțului la suprafața piesei.



În fig. 4.42 se prezintă variația lățimii tăieturii la partea superioară cu puterea medie, plan experimental 4.1. (tabelul 2.12). Se observă că pe domeniul experimental studiat se obține o creștere a lățimii tăieturii la partea superioară. Creșterea se termină cu un palier constant, variațiile lățimii tăieturii cu puterea fiind foarte mici la puteri peste 220 W.

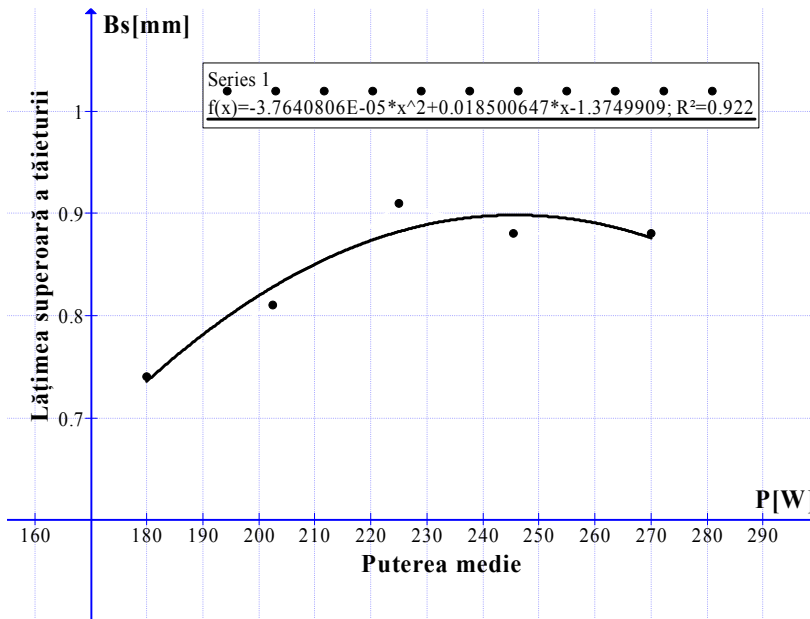


Fig. 4.42 Variația lățimii superioare a tăieturii cu puterea medie la viteza de 200 mm/min pentru, grosimea 3.4 mm, durata pulsului  $t_p=1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f=30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Fig. 4.43 prezintă variația lățimii tăieturii la partea superioară a piesei cu viteza de tăiere pentru **grosimea de 3,4 mm**, plan experimental 4.2. (tabelul 2.12). Variațiile pe domeniul experimental sunt mici, acestea nu depășesc 0,1 mm. Se arată că viteza de tăiere nu produce variații puternice ale lățimii tăieturii la partea superioară. Există totuși variații locale modelate de minimul și maximum funcției de regresie. Acestea sunt asociate cu situația în care efectele iradierii se manifestă în interiorul materialului (un minim pentru lățimea tăieturii la partea superioară  $B_s$ ) respectiv la suprafața, un maxim pentru  $B_s$ .

Lățimea superioară a tăieturii  $B_s$  a fost mai mare decât în cazurile anterioare. Acest lucru s-a datorat atât tipului de tăietură nepenetrat cât și focalizării fasciculului laser în interiorul piesei care a crescut dimensiunea petei fasciculului laser la suprafața piesei.

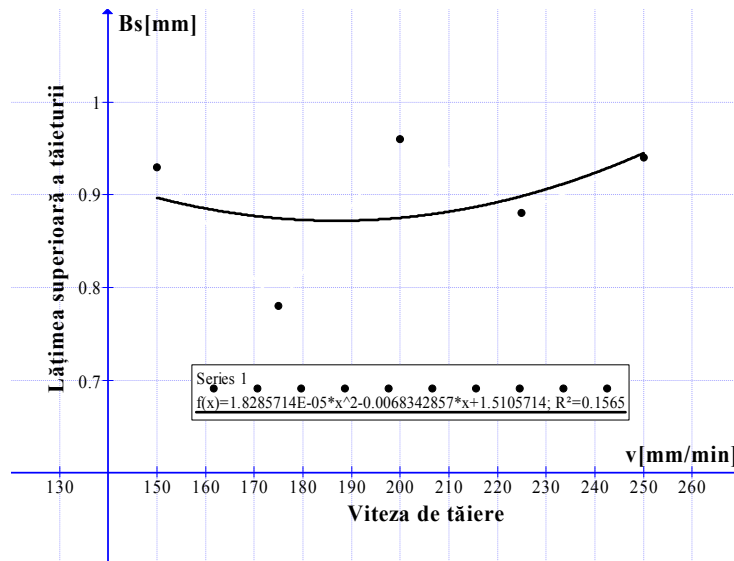


Fig. 4.43 Variația lățimii tăieturii la partea superioară cu viteza de tăiere la puterea  $P = 225W$  pentru grosimea  $3.4\text{ mm}$ , durata pulsului  $t_p = 1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f = 30\text{Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

#### 4.2.3.3. Analiza situațiilor în care procesul de tăiere nu a fost realizat

Unele din tăieturile realizate au prezentat probleme legate de penetrarea tăieturii în material. Se remarcă două tipuri distincte de tăieturi:

- tăieturi complet nepenetrante pentru care nu s-a realizat măsurarea lățimii tăieturii la partea inferioară;
- tăieturi pentru care s-a realizat măsurarea lățimii tăieturii la partea inferioară, dar care prezintă probleme de penetrare de-a lungul tăieturii.

Pentru aceste tăieturi s-a măsurat profunzimea tăieturii. Rezultatele sunt prezentate în tabelele din Anexa 2, tabel A2.7.

Pentru **grosimea de 1,5 mm** tăieturile au prezentat lipsa penetrării complete pe anumite porțiuni de-a lungul tăieturii. Astfel lățimea tăieturii la partea inferioară a fost măsurată, dar piesele nu ar putea fi complet despărțite în urma procesului de tăiere.

Cauza generală pentru obținerea lipsei de penetrare constantă de-a lungul tăieturii a fost viteza de tăiere ridicată. Tăieturi incomplet penetrate au fost obținute pentru ambele planuri experimentale 1.1 și 1.2. (tabelul 2.9). Valorile ridicate ale vitezei de tăiere au dus la obținerea unor valori relativ mici pentru raportul **Spo**. Acesta are în general valori sub 0,5. Valoarea raportului **Spo** devine importantă în condițiile în care un singur puls nu este necesar pentru a penetra materialul. Principalele probleme care apar la partea inferioară a tăieturii penetrarea incompletă

și afectarea termică sunt cauzate de un aport ridicat de energie. Acesta este realizat la putere ridicată și viteză de tăiere redusă.

O cauză posibilă a lipsei de penetrare este prezența sticlei topite. Se arată astfel că problemele sunt create de modul în care este folosită energia transmisă de către fasciculul laser materialului și nu de nivelul acesteia. Se remarcă faptul că pentru tăieturile realizate pe grosimea de 1,5mm, numărul de pulsuri consecutive care iradiază o zonă dată a materialului nu depășește valoarea 2.

Pentru cu **grosimea de 1,7 mm**, problemele legate de penetrare apar la un număr redus de tăieturi. Pentru seria experimentală 2.1 (tabelul 2.10), unde s-a variat puterea, problemele apar la tăieturile 4 și 5. Acestea sunt cauzate de nivelul puterii. Puterea medie cobârâtă duce la scăderea intensității fasciculului laser. Pentru planul experimental 2.2 (tabelul 2.10). s-au obținut tăieturi nepenetrare la viteză de tăiere ridicată, tăieturile 8,9 și 10. Vitezele de tăiere pentru planul experimental 2.2 (tabelul 2.10) au fost mai mici în comparație cu cele utilizate la grosimea de 1,5 mm.

S-a continuat domeniul experimental prin scăderea nivelului vitezei. Astfel numai valorile vitezei de 50 mm/min, respectiv 75 mm/min produc tăieturi complet penetrate. Planul experimental 2.1 (tabelul 2.10) arată că, pentru viteza de 100 mm/min, care se află la limita domeniului experimental unde se produce tăierea, nivelul puterii este important pentru realizarea procesului de tăiere.

**Grosimea de 3,4 mm** prezintă tăieturi realizate la aceleași valori ale vitezei de tăiere ca și pentru grosimea de 1,5 mm. Diferențele constau în grosimea ridicată a plăcii, focalizarea în interiorul plăcii și nivelul ridicat al puterii. În ciuda folosirii unor puteri ridicate ale fasciculului laser și asigurarea prin focalizare a unor condiții pentru tăierea unei plăci mai groase toate tăieturile obținute nu au fost penetrate.

Cauza principală a fost viteza de tăiere ridicată. Astfel prin modificarea condițiilor experimentale anterior amintite, valorile raportului **Spo** nu s-au modificat. Valorile raportului **Spo** mici sunt cauza pentru care procesul de tăiere nu s-a realizat. În comparație cu grosimea de 1,5mm, rezultatele sunt mai nefavorabile. Dacă pentru grosimea 1,5 mm tăieturile prezintă instabilități în penetrare de-a lungul tăieturii, pentru grosimea de 3,4 mm, tăieturile sunt complet nepenetrare și la partea inferioară nu se obține cel puțin afectarea termică a materialului

Penetrarea maximă a materialului se obține pentru tăietura 3.4N6 unde viteza de tăiere pe domeniul experimental a fost minimă. În acest caz penetrarea obținută este de 80% din grosimea materialului. În restul cazurilor penetrarea se situează sub această valoare.

O problemă importantă o reprezintă efectul puterii la realizarea penetrării în material. Dacă se studiază penetrările obținute în material se observă că pentru grosimea de 3.4 mm, pentru toate tăieturile realizate, penetrările obținute depășesc valoarea de 1.5 mm cât a fost grosimea plăcii 1. Astfel, creșterea puterii a avut efect, însă acesta nu a fost suficient. Focalizarea în interiorul piesei a scăzut intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei. Astfel se anulează o parte din efectul dat de creșterea puterii. Afectarea termică la suprafața materialului este mai mică decât la grosimea de 1,5mm. Aceasta se explică prin conducția căldurii în interiorul materialului, care este mai gros.

Afectarea termică la suprafața materialului crește cu creșterea vitezei de tăiere și cu scăderea penetrării în material datorită transmiterii căldurii prin convecție către suprafața materialului. Penetrările mari ale tăieturilor în material se obțin la putere ridicată și viteză de tăiere redusă.

Lipsa afectării termice importante face ca procesarea laser în condițiile experimentale pentru tăieturile realizate pe grosimea de 3,4 mm să fie favorabile pentru realizarea de șanțuri pe plăcile din material compozit, deși ele sunt defavorabile pentru realizarea procesului de tăiere.

**Grosimea 4,6 mm** a avut cea mai mare grosime dintre plăcile utilizate în experimente. S-au obținut tăieturi cu probleme de penetrare atât pentru planul experimental 6.1 (tabelul 2.14), unde s-a variat puterea, cât și pentru planul experimental unde s-a variat viteza de tăiere. Pentru seria experimentală 6.1 (tabelul 2.14), penetrarea este relativ mare, depășește 4 mm (se obțin penetrări peste 90% din grosimea piesei) astfel că lipsa penetrării tăieturii este dată de scăderea puterii și de asocierea cu viteza de tăiere care este relativ ridicată pentru situația experimentală dată. Pentru planul experimental 6.2 (tabelul 2.14), problemele de penetrare apar la tăieturile realizate la viteză de tăiere ridicată, începând cu viteza de 100 mm/min. Se observă că există o legătură a penetrării tăieturii cu creșterea vitezei de tăiere.

Tăierea cu fascicul laser a materialului compozit CEFS conduce la obținerea de tăieturi complet penetrare și tăieturi care prezintă probleme de penetrare. Se pune problema dacă tăieturile prinse la partea inferioară pot fi acceptate în anumite condiții.

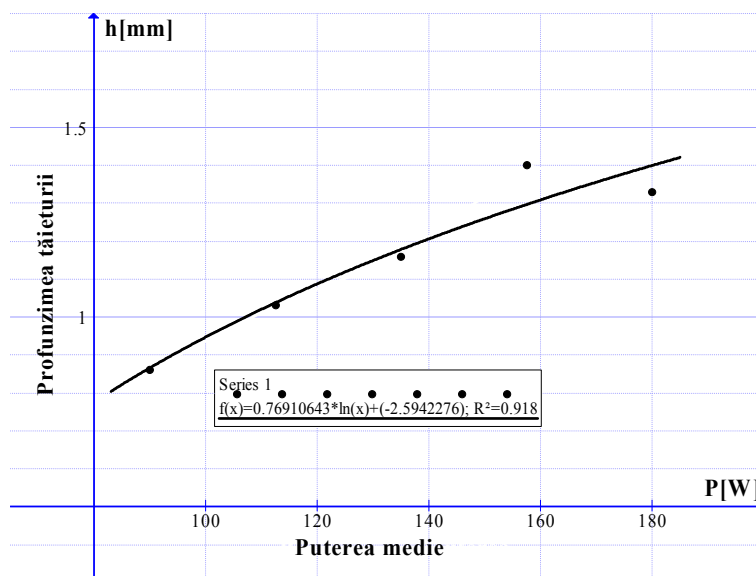


Fig. 4.44 Variația profundimii tăieturii cu puterea medie la viteza de tăiere  $v=200$  mm/min, grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$ ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

Răspunsul este negativ deoarece separarea mecanică prin îndoire și rupere a celor două părți ale tăieturii nu se poate realiza. Ca rezultat principal al analizei tăieturilor nepenetrante sau cu probleme de penetrare se obține recomandarea să se utilizeze viteze sub 100 mm/min. Unele din variațiile profunzimii tăieturilor au conținut părți din planurile experimentale clasice cu un număr suficient de puncte pentru a se utiliza reprezentarea grafică cu funcții de regresie. Acestea sunt prezentate grafic în fig 4.44 - 4.48.

Pentru grosimea de 1,5 mm, tăieturile analizate sunt tăieturi care prezintă probleme de penetrare de-a lungul tăieturii.

Tăieturile realizate grosimea de 3,4 mm sunt tăieturi complet nepenetrante, la partea inferioară a piesei nu poate fi văzută o afectare termică.

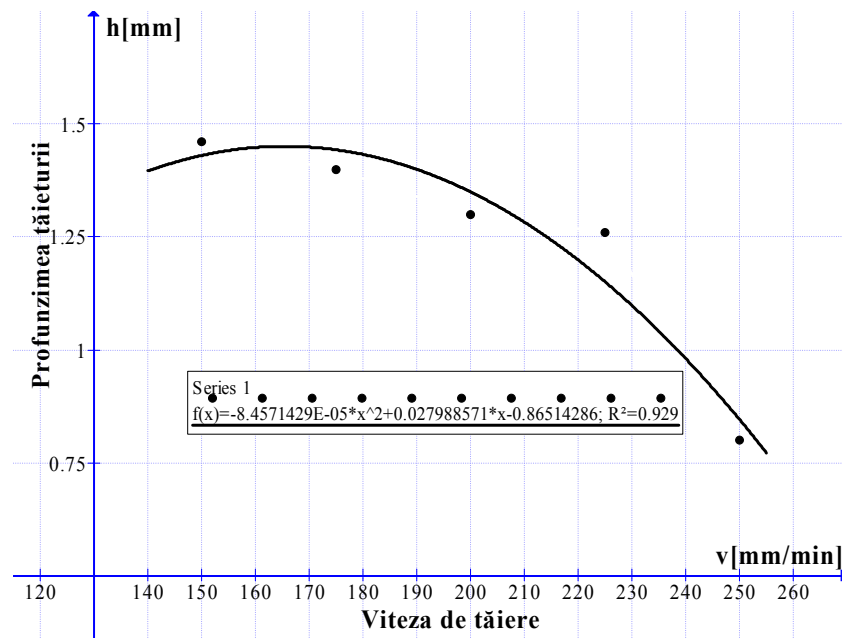


Fig. 4.45 Variația lățimii tăieturii cu viteza de tăiere la puterea medie  $P=135$  W grosimea de 1.5 mm, durata pulsului  $t_p=1.5$  ms, frecvența de pulsare  $f=30$  Hz, defocalizarea  $\delta = 0$

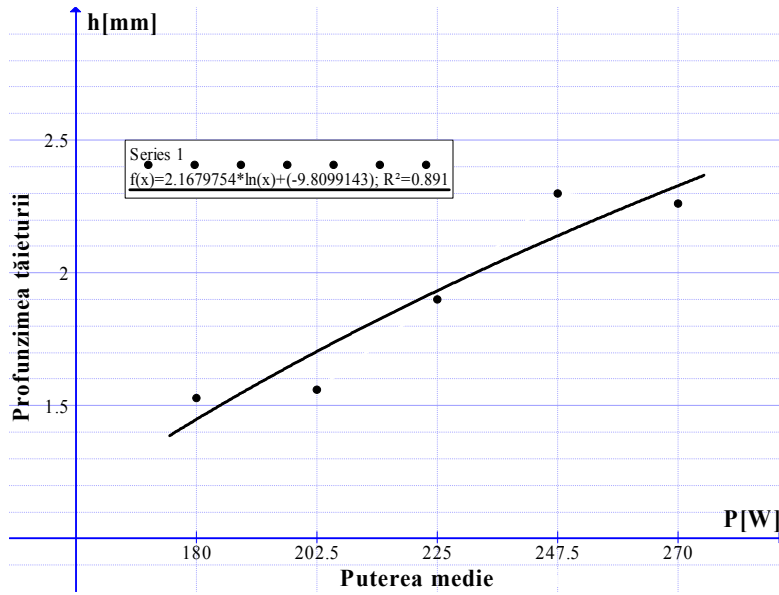


Fig. 4.46 Variația lățimii superioare a tăieturii cu puterea medie la viteza de 200 mm/min pentru grosimea 3.4 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f = 30\text{ Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

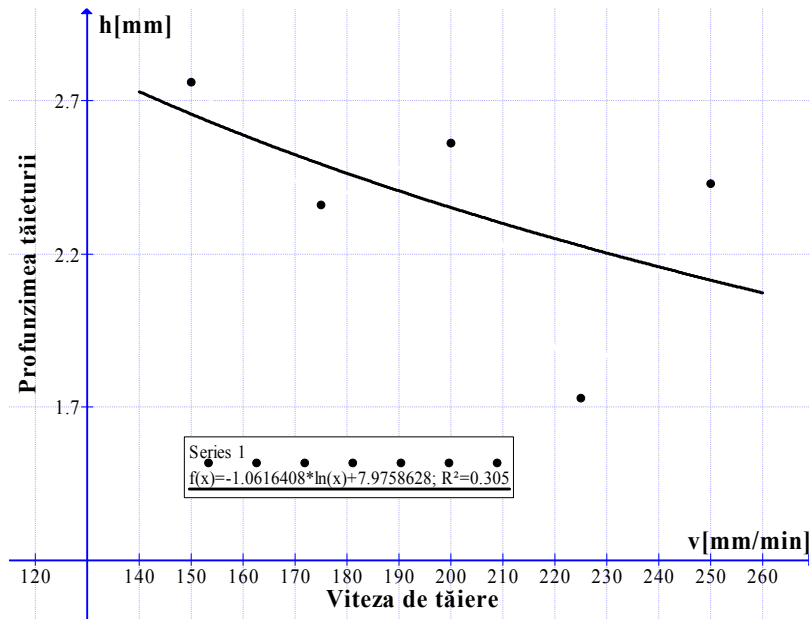


Fig. 4.47 Variația profunzimii tăieturii la partea superioară cu viteza de tăiere la puterea  $P = 225\text{W}$  pentru, grosimea 3.4 mm, durata pulsului  $t_p = 1.5\text{ms}$ , frecvența de pulsare  $f = 30\text{Hz}$ , defocalizarea  $\delta = -2\text{mm}$

Pentru grosimea de 4,6 mm se prezintă tăieturi care prezintă variații de penetrare ca și grosimea de 1,5 mm.

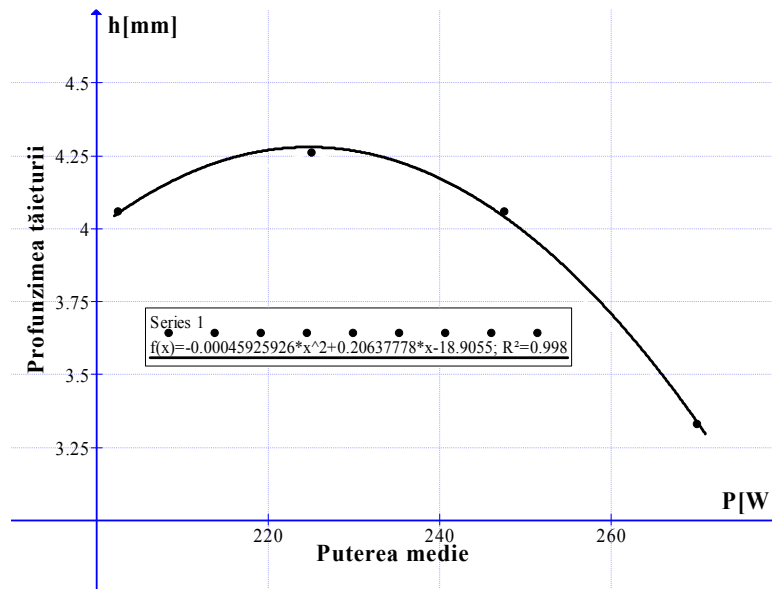


Fig. 4.48 Variația profunzimii tăieturii cu putere pentru grosimea de 4,6mm, planul experimental 6.1. (tabelul 2.13).

Prezența tăieturilor nepenetrante arată că numai pentru o parte din domeniului experimental studiat se poate realiza procesul de tăiere. Condițiile experimentale care au dus la nepenetrarea tăieturilor pot fi exprimate în raport cu factorii variații sau cu mărimi care caracterizează iradierea. Ambele tipuri de caracterizări sunt importante.

### 4.3. Concluzii parțiale

Capitolul 4 are cea mai mare extensie în cadrul tezei și concentrează principalele rezultate originale ale cercetării doctorale. Sunt analizate funcții obiectiv care consideră dimensiunile tăieturilor realizate și funcții obiectiv care caracterizează procesul de tăiere.

Au fost considerate două planuri experimentale factoriale de tip  $2^3$ . Primul din acestea a considerat tăieturile realizate la experimentul E1F, iar al doilea pentru o selecție din tăieturile de la experimentul E2F. Pentru toate funcțiile obiectiv analizate se prezintă modele matematice polinomiale de gradul doi. Acestea corelează valorile funcțiilor obiectiv cu valorile factorilor de influență. Obținerea modelelor matematice este însoțită de analiza statistică a variațiilor ANOVA. Aceasta determină coeficienții de corelație pentru modelele obținute și arată aplicabilitatea

acestora prin testul statistic Fisher. Se prezintă efectul factorilor de influență asupra funcției obiectiv studiate prin diagrame Pareto. Acestea realizează o ierarhizare a efectelor factorilor și interacțiunilor dintre aceștia.

O formă a modelului matematic este reprezentată grafic sub forma de suprafețe de răspuns. Efectele factorilor sunt analizate din punct de vedere tehnologic și fenomenologic. Se identifică condițiile optime pentru realizarea procesului de tăiere. Pentru planurile experimentale clasice realizate la experimentul E2F au fost realizate reprezentări grafice folosind funcții de regresie. S-a analizat variația fiecărei funcții obiectiv în parte. S-a analizat efectul energiei liniare asupra funcțiilor obiectiv, pentru funcțiile obiectiv realizând comparații pentru plăcile de grosimi diferite. S-au analizat cauzele care au dus la obținerea unor tăieturi nepenetrante sau care au o penetrare instabilă de-a lungul tăieturii.



## **5. REZULTATELE CERCETĂRII EXPERIMENTALE (ASPECTE CALITATIVE)**

### **5.1. Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser**

#### **5.1.1. Introducere**

Așa cum s-a arătat în capitolul 3, procesul generării suprafețelor de separare a materialelor din clasa CEFS prin acțiunea combinată termică, chimică și mecanică a fascicului laser și a jetului de gaz insuflat coaxial cu acesta, este deosebit de complex. În situația analizată, prelevarea materialului excedentar din zona de tăiere se realizează, în principal, prin descompunerea termo-chimică a materialului iradiat și include fenomene de încălzire și ardere a matricii polimerice, de încălzire, fracturare, înmuiere și topire a fibrei de sticlă, de curgere a jetului de gaze fierbinți constituit din produse ale reacțiilor chimice și ale acțiunii erozive dezvoltate de acesta în lungul traiectoriei de separare. Toate aceste fenomene de desfășoară simultan și au un caracter dinamic, evolutiv.

Studiul în situ și în timp real a mulțimii fenomenelor de interacțiune radiație laser-material compozit, în condițiile date, depășește obiectivele prezentei teze și, în același timp, este extrem de dificil și necesită o aparatură de investigație pretențioasă și costisitoare (capitolul 1).

O parte importantă a informațiilor referitoare la fenomenele descrise anterior, poate fi recuperată ulterior procesului de tăiere propriu-zis, prin examinarea macro- și micro-scopică a tăieturilor efectiv realizate, în condiții determinate, cunoscute, ale tăierii laser. Această abordare caracterizează și cercetarea doctorală efectuată. Datorită finalității tehnologice a acesteia, rezultatele obținute sunt corelate, în mai mare măsură, cu calitatea tăieturilor și stabilitatea proceselor de tăiere laser și, în mai mică măsură, la nivelul minim necesar, cu fenomenologia proceselor de tăiere.

Această opțiune este justificată de faptul că reperele/produsele industriale din CEFS se realizează uzual la configurația aproape finală prin procese tehnologice de termo-formare. În aceste condiții, prelucrările ulterioare (prin separare sau așchiere, inclusiv prin tăiere laser), aplicate în cazuri particulare, trebuie să asigure local o calitate superioară a suprafețelor generate, corespunzătoare unor operații de asamblare sau montaj.

Rezultatele obținute prin investigarea optică a topografiei suprafețelor tăieturilor realizate cu laser, în condițiile actualei cercetări doctorale, sunt prezentate în continuare.

În cele ce urmează, referirea la **partea superioară**, definește suprafața nemijlocit iradiată a plăcilor din CEFS, în timp ce referirea la **partea inferioară**, desemnează suprafața plăcilor din CEFS opusă suprafeței iradiate, deci suprafața de ieșire a jetului de gaze fierbinți din materialul supus tăierii laser.

### 5.1.2. Calitatea muchiilor longitudinale ale tăieturilor

#### 5.1.2.1. Experimentul E1F (p. 2.3.1)

Pentru a evidenția efectele produse în materialul compozit în urma tăierii cu fasciculul laser în tabelul 5.1 s-au prezentat imagini ale tăieturii la partea inferioară. Se poate observa obținerea unor suprafețe degradate termic ale pereților tăieturii, pentru toate tăieturile realizate.

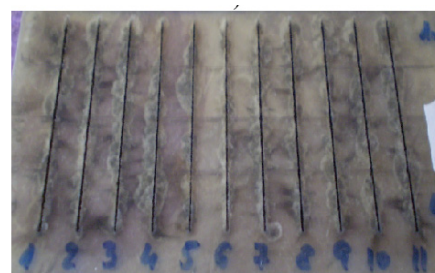
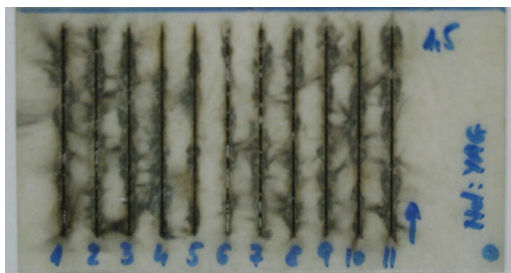
În ceea ce privește calitatea tăieturii, putem identifica, în esență, următoarele situații:

- tăieturi bune - tăieturi continui, uniforme: încercările 4; 6 și 8;
- tăieturi acceptabile- tăieturi discontinui: încercările 2; 5; 7; 9;
- tăieturi necorespunzătoare - tăietura nepătrunsă: încercările 1 și 3.

Analizând tăieturile se observă că pentru puteri mici și viteze de tăiere mici se obțin tăieturi rectilinii; de asemenea, tăieturi rectilinii se obțin pentru puteri ridicate și viteze de tăiere mari.

#### 5.1.2.2. Experimentul E2 (p 2.3.2)

În figurile următoare sunt reprezentate cele 6 grosimi diferite ale plăcilor supuse tăierii, pe care se poate observa și descrie fiecare tăietură în parte. În tabelele alăturate figurilor sunt prezentate observații cu privire la calitatea tăieturilor realizate.



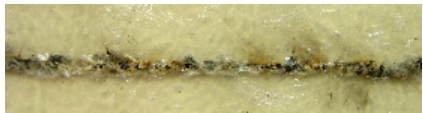
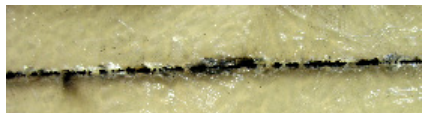

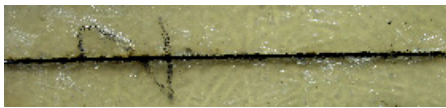





a) partea superioară a plăcii

b) partea inferioară a plăcii

Figura 5.1. Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 1,5 mm,

5.1. Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser 147

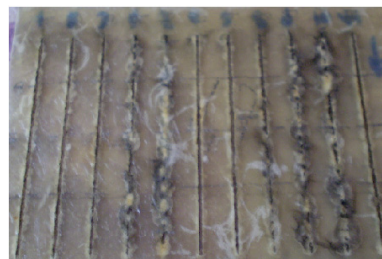
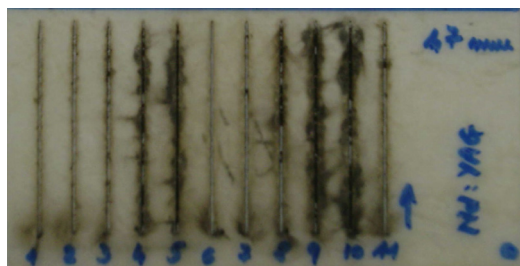
Tabel 5.1 Caracterizarea tăieturilor obtinute la E1F

Încercarea	Partea inferioară a tăieturii	Viteza v [mm/min]	Frecvența f [Hz]	Puterea P [W]	Observații
1.		106,2	22	44	Nepătrunsă, profil V
2.		54	22	44	Tăietură discontinuă, profil trapezoidal, cu baza mare sus
3.		106,2	25	44	Patrunsă incomplet, darmai mult decât 1, puternic arsă
4.		54	25	44	Profil trapezoidal, cu baza mare jos
5.		106,2	22	100	Tăietură discontinuă, suprafață puternic degradată și arsă, profil trapezoidal cu baza mare sus.
6.		54	22	100	Profil în V, lățimea tăieturii mai mare decât la tăietura 4.
7.		106,2	25	100	Tăietură discontinuă, suprafețe arse, profil trapezoidal cu baza mare sus
8.		54	25	100	Tăietură bună, profil trapezoidal, cu baza mare jos
9.		80,1	23,5	72	Paralelism relativ bun, tăietură discontinuă

148 Rezultatele cercetării experimentale - aspecte calitative

Tabel 5.2 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 1,5 mm

Încercarea	Observații
1,5N1	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, porțiuni mici pătrunse, muchii deteriorate.
1,5N2	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N3	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N4	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N5	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N6	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N7	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, porțiuni mici pătrunse, muchii deteriorate.
1,5N8	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N9	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N10	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.
1,5N11	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic degradate, rezidui de material pe suprafață.



a) partea superioară a plăcii

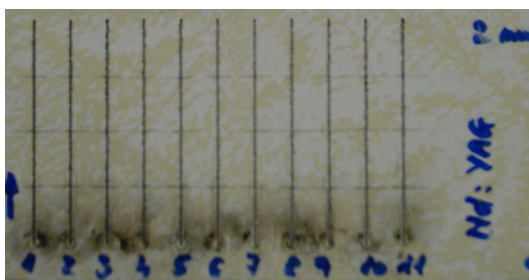
b) partea inferioară a plăcii

Fig. 5.2. Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 1,7 mm

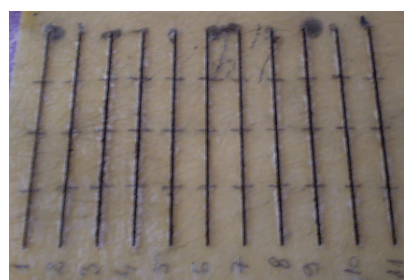
## 5.1. Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser 149

Tabel 5.3 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 1,7 mm

Încercarea	Observații
1,7N1	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT uniformă, muchii degradate.
1,7N2	<b>Partea superioară:</b> muchii rupte, puternic degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
1,7N3	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, rupte.
1,7N4	<b>Partea superioară:</b> tăietura degradată în profunzime, muchii rupte; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, rupte, rezidui de material pe suprafață
1,7N5	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchii uniforme; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, rezidui de material pe suprafață.
1,7N6	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT uniformă, muchii franjurate.
1,7N7	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
1,7N8	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, rezidui de material pe suprafață.
1,7N9	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, rupte, rezidui de material pe suprafață.
1,7N10	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă, bucăți de material lipsă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, rupte, rezidui de material pe suprafață.
1,7N11	<b>Partea superioară:</b> muchii degradate, tăietura neuniformă, bucăți lipsă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT uniformă, muchii franjurate.



a)



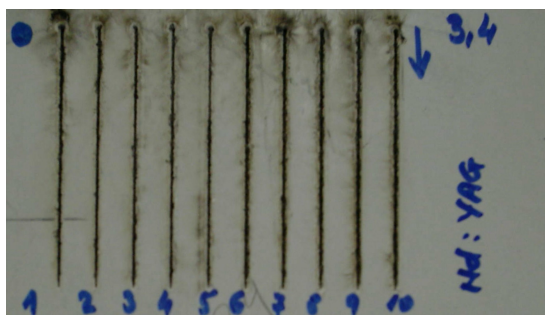
b)

Fig 5.3 Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 2mm  
a) partea superioară a plăcii, b) partea inferioară a plăci

150 Rezultatele cercetării experimentale - aspecte calitative

Tabel 5.4 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 2 mm

Încercarea	Observații
2N1	<b>Partea superioară:</b> muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT uniformă, muchii drepte
2N2	<b>Partea superioară:</b> muchii puțin franjurate; <b>Partea inferioară:</b> uniformă, muchii drepte
2N3	<b>Partea superioară:</b> muchii puțin franjurate; neuniformă, puțin arsă, reziduri pe suprafață
2N4	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> neuniformă
2N5	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> uniformă, muchii drepte
2N6	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> uniformă, muchii drepte
2N7	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> uniformă, muchii drepte
2N8	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, arsă, reziduri pe suprafață
2N9	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, arsă, reziduri pe suprafață
2N10	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, arsă, reziduri pe suprafață, pereții interiori ai tăieturii înclinați.
2N11	<b>Partea superioară:</b> muchii franjurate; <b>Partea inferioară:</b> – ZIT neuniformă, arsa, reziduri pe suprafață.



a) partea superioară a plăcii

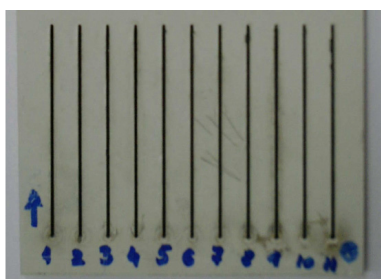
b) partea inferioară a plăcii

Figura 5.4 Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 3,4 mm

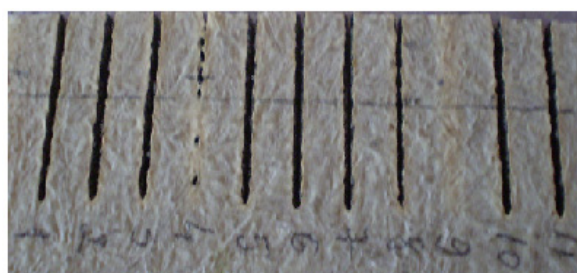
## 5.1. Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser 151

Tabel 5.5 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 3,4 mm

Încercarea	Observații
3,4 N1	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N2	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N3	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N4	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N5	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, franjurate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N6	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, franjurate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N7	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N8	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, franjurate, bucăți de material sărite de pe suprafață.
3,4 N9	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, franjurate, bucăți de material sărite de pe suprafața, puternic afectată în partea stângă, tăietură cu pereți interiori înclinați
3,4 N10	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, franjurate, bucăți de material sărite de pe suprafața, puternic afectată în partea stângă, tăietură cu pereții interiori înclinați



a) partea superioară a plăcii



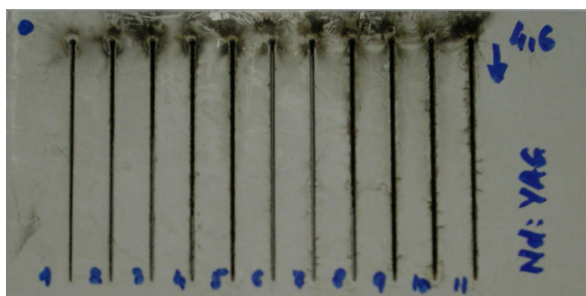
b) partea inferioară a plăcii

Fig. 5.5 Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 4,2 mm

152 Rezultatele cercetării experimentale - aspecte calitative

Tabel 5.6 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 4,2 mm

Încercarea	Observații
4,2 N1	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafață, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.
4,2 N2	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafață, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.
4,2 N3	<b>Partea superioară:</b> muchii drepte, tăietura neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.
4,2 N4	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafață, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate, tăietură nepătrunsă în totalitate
4,2 N5	<b>Partea superioară:</b> muchii drepte, tăietură neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate
4,2 N6	<b>Partea superioară:</b> muchii drepte, tăietura neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii puternic deteriorate, rupte
4,2 N7	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafața, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> muchii drepte, ZIT neuniformă în profunzime
4,2 N8	<b>Partea superioară:</b> muchii drepte, tăietură neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.
4,2 N9	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafața, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> nepătrunsă.
4,2 N10	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă la suprafață, neuniformă în profunzime; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.
4,2 N11	<b>Partea superioară:</b> muchii drepte, tăietură neuniformă în profunzime, fisură în partea stângă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii franjurate.



a) partea superioară a plăcii

b) partea inferioară a plăcii

Fig 5.6 Imagini ale muchiilor tăieturilor pentru grosimea de 4,6 mm



## 5.1. Calitatea suprafețelor tăieturilor realizate cu laser 153

Tabel 5.7 Observații asupra tăieturilor la grosimea de 4,6 mm

Încercarea	Observații
4,6N1	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură cu pereții înclinați; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
4,6N2	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură conică tip pâlnie; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
4,6N3	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, tăietura conică tip pâlnie; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
4,6N4	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, bucăți de material lipsă, reziduri de material pe suprafață
4,6N5	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură conică tip pâlnie; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii arse, reziduri de material pe suprafață.
4,6N6	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură conică tip pâlnie; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
4,6N7	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, fisurată în partea dreaptă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură conică tip pâlnie; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate.
4,6N8	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, tăietură cu pereții înclinați <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, bucăți de material lipsă, reziduri de material pe suprafață.
4,6N9	<b>Partea superioară:</b> ZIT uniformă, fisurată în partea dreaptă, muchie dreaptă în partea stângă, franjurată în partea dreaptă, tăietură cu pereții înclinați ; <b>Partea inferioară:</b> - nepătrunsă
4,6N10	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, fisurată în ambele părți ale tăieturii. <b>Partea inferioară:</b> - nepătrunsă.
4,6N11	<b>Partea superioară:</b> ZIT neuniformă, muchii degradate, bucăți de material lipsă din partea dreaptă; <b>Partea inferioară:</b> ZIT neuniformă, material lipsa, reziduri de material pe suprafață.

### 5.1.3. Topografia suprafețelor efective ale tăieturilor

Caracteristicile suprafețelor efective ale tăieturii sunt extrem de importante pentru aprecierea rezultatelor procesului de tăiere. Tăierea laser a metalelor produce striații și forme fizice ce caracterizează fiecare suprafață în parte, în timp ce tăierea laser a materialului compozit CEFS a arătat o realitate diferită. Astfel, pentru toate plăcile subțiri, suprafața prezintă depuneri de carbon care sunt uniforme și nu permit punerea în evidență a unor detalii specifice. Un exemplu în acest sens este

oferit în fig. 5.7. Se prezintă tăietura de pe placa 4 pe care a fost realizat experimentul E1F. În continuare, imaginile tăieturii vor fi prezentate cu partea superioară deasupra.

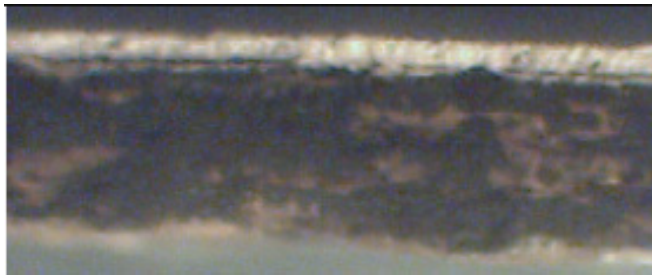


Fig. 5.7 Suprafața efectivă a tăieturii pentru tăietura 4 pe grosimea de 2 mm de la experimentul E1F

Depunerea de carbon se datorează arderii rășinii epoxidice. Căldura necesară inițierii arderii la 490°C este transmisă prin conducție. Astfel, arderea nu este prezentă în zona în care există vaporizare și dezintegrarea materialului intensă. Se observă această lipsă a stratului de carbon la suprafața piesei.

La plăcile subțiri există o transmitere prin conducție a căldurii înaintea fasciculului laser. Aceasta explică carbonizarea puternică a suprafeței interioare a tăieturii la plăcile subțiri. La plăcile groase, transmiterea căldurii are loc în interiorul materialului și astfel carbonizarea se produce la partea inferioară a tăieturii. Creșterea timpului de interacțiune între radiația laser și material este un factor important pentru creșterea depunerilor de carbon pe partea interioară a tăieturii.

Pentru o analiză mai detaliată a suprafețelor interioare a tăieturii s-a selectat o grosime mare și anume, de 4.2 mm. Din punct de vedere dimensional, tăieturile realizate pe această grosime au fost complet penetrate, au arătat stabilitate de-a lungul tăieturii și pot fi considerate de calitate. Placa a fost secționată la 15 mm, respectiv la 25 mm de la începerea tăieturii. S-au extras astfel probe care au fost fotografiate la microscop. Figurile următoare prezintă caracteristici ale suprafeței tăieturilor pentru ambele părți ale acesteia.

Fotografiile suprafeței efective a tăieturilor realizate pe grosimea de 4.2 mm au arătat unele caracteristici generale. Astfel, au fost puse în evidență două zone. Zona de la partea superioară prezintă depunere de carbon redusă și rupturi longitudinale. Rugozitatea acestei zone este mai mică decât a zonei de la partea inferioară. La partea inferioară a piesei există o zonă în care se întâlnesc depuneri de carbon, rupturi și adâncituri mari în material și de asemenea prezența sticlei topite. Dimensiunile celor două zone au fost aceleași pentru ambele părți ale tăieturii, notate cu a), respectiv b). Cele două zone au avut aceleași dimensiuni pe ambele părți ale tăieturii pentru toate tăieturile analizate.

În fig 5.8 se prezintă suprafața interioară a tăieturilor pentru tăieturile realizate la puterea de 270 W. Se observă că depunerea de carbon apare la viteză de tăiere mică și respectiv la viteză de tăiere mare. Se observă prezența sticlei

topite care a curs și s-a depus pe suprafața tăieturii. Unde s-a produs multă sticlă topită aceasta a curs vertical producând structuri asemănătoare striațiilor. Creșterea vitezei de tăiere produce înclinarea acestora. Prezența sticlei topite nu este continuă pe o parte a tăieturii. Astfel ea este înlocuită de rupura și arsura materialului.

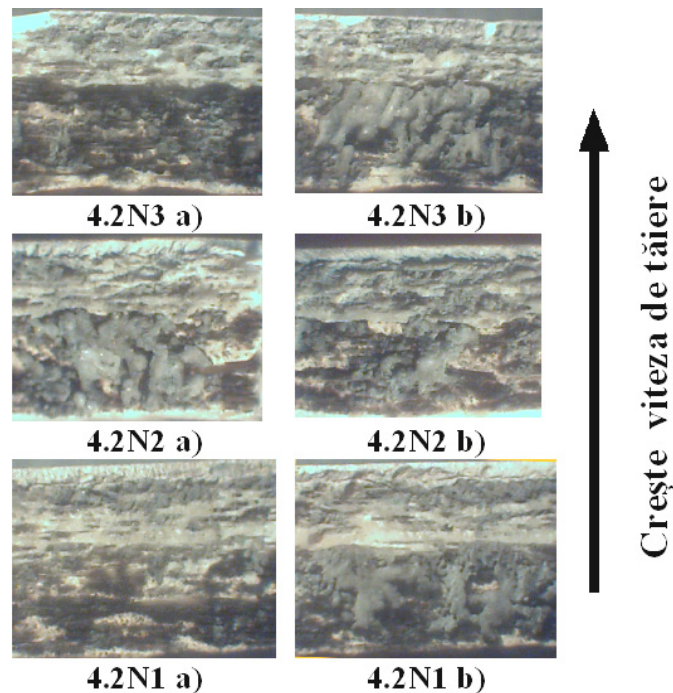


Fig. 5.8 Aspecte ale suprafeței efective a tăieturii la puterea  $P=270$  W

Există o comportare asimetrică între cele două părți ale tăieturii. Astfel, părțile pe care se observă topirea și curgerea sticlei se opun părților pe care se observă ruperea materialului. Zona de la suprafață prezintă numai rupturi în material. Acestea sunt dispuse longitudinal și sunt mai mici decât cele de la partea inferioară. Suprafața de la partea superioară prezintă o rugozitate mai mică decât partea inferioară. În fig. 5.8. se observă că partea suprafeței superioare are o calitate mai bună la viteză de tăiere mică.

În fig. 5.9 se prezintă suprafața efectivă a tăieturilor realizate la puterea de 225W. Pe tăieturile prezentate se observă absența curgerii sticlei topite. La viteză de tăiere mică există o extindere a zonei de la partea superioară și o îmbinare uniformă a acesteia cu cea de la partea inferioară. La viteză de tăiere mică există arsuri la partea inferioară. Calitatea suprafeței la partea superioară este mai bună. Prezența sticlei topite și înclinarea depunerilor de sticlă topită se observă numai la viteză mare.

Fig. 5.10 prezintă aspecte ale suprafeței efective a tăieturilor realizate la puterea de 180 W. Se observă prezența arsurii pe toate tăieturile analizate.

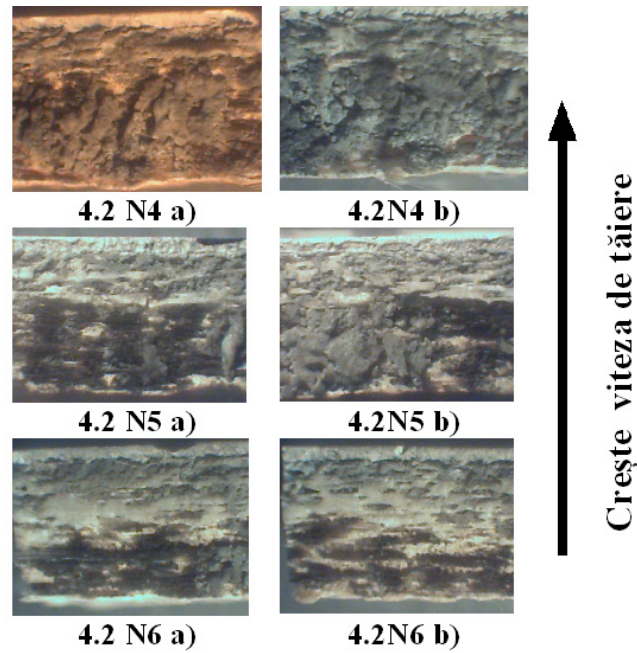


Fig. 5.9 Aspecte ale suprafeței efective a tăieturii la puterea P=225W

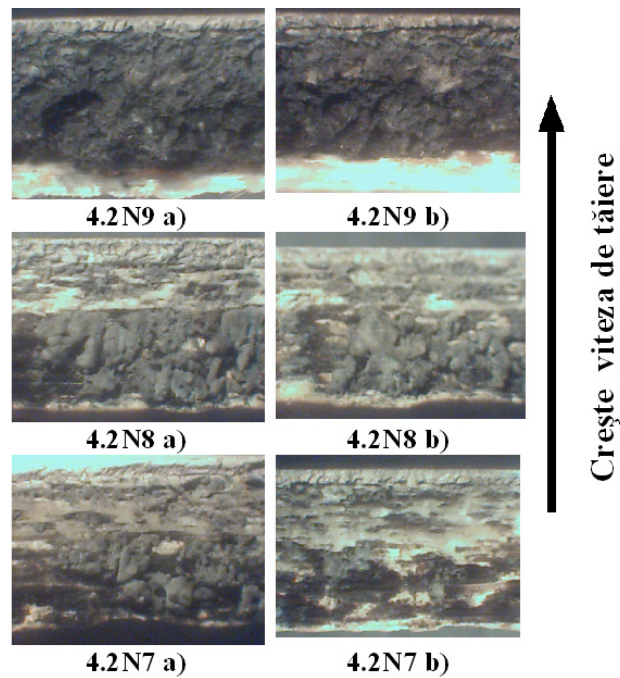


Fig. 5.10 Aspecte ale suprafeței interioare a tăieturii la puterea P=180W

Creșterea vitezei de tăiere crește zona de la partea inferioară în care există arsuri și rupturi ale suprafeței tăieturilor. Pentru tăieturile din fig. 5.9 se observă o cantitate mică de sticlă solidificată. Prezența acesteia este asociată cu viteza de tăiere scăzută.

Fig. 5.11 prezintă imagini ale suprafeței efective a tăieturilor care au fost realizate în aceleași condiții experimentale, replici. Structurile prezentate de aceste tăieturi sunt asemănătoare. Se arată că există o reproductibilitate a efectelor pentru aceleași condiții experimentale.

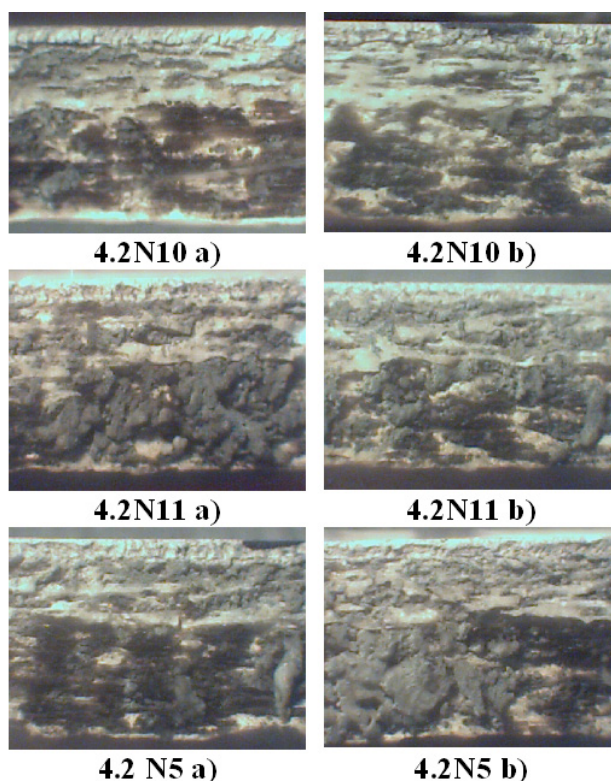


Fig. 5.11 Aspecte ale suprafeței efective a tăieturii replici la puterea  $P=225W$  și viteza de tăiere  $v=75$  mm/min

Pentru tăieturile prezentate pot fi efectuate unele corelații cu factorii de influență. Astfel, nivelul inferior al puterii a fost suficient pentru a realiza ruperea fibrei de sticlă și arderea rășinii. Nivelul ridicat al puterii a realizat topirea masivă a sticlei. Creșterea vitezei de tăiere are un efect general de diminuare a calității tăieturii fără a putea fi asociată direct cu arderea și ruperea fibrei de sticlă sau cu topirea sticlei. Imaginea tăieturii 4.2 N9 arată deteriorarea puternică a calității suprafeței efective a tăieturii pentru o putere scăzută și viteză de tăiere scăzută, adică pentru o iradiere a materialului redusă.

Se recomandă astfel o iradiere în exces pentru a obține tăieturi de calitate. Separarea între cele două zone pe suprafața interioară a tăieturii este apropiată de adâncimea de 2 mm sub suprafața piesei unde s-a realizat focalizarea fascicului laser. Se observă o îngustare a tăieturii în această zonă. Degradarea calității suprafeței tăieturii la partea inferioară poate fi explicată și prin scăderea presiunii gazului asistent. Se arată că penetrarea materialului este strict asociată cu zona de acțiune a fascicului laser.

#### 5.1.4 Afectarea termică a materialului

Pentru afectarea termică a materialului se disting două situații particulare și anume: degradări ale materialului la suprafața efectivă a tăieturii și degradări ale materialului în interiorul său. La suprafața efectivă a tăieturii se obțin arsuri și depunere de carbon pe întreaga suprafață. Acestea apar mai frecvent pentru tăieturi late. Se întâlnesc și rupturi la suprafața materialului pentru plăcile groase. Zona influențată termic în aceste cazuri este mică și nu poate fi separată de defectele care apar pe suprafața interioară a tăieturii. Afectarea termică importantă se produce prin arderea rășinii în jurul fibrei de sticlă. Acest fenomen se întâlnește numai pentru grosimi ale materialului de 1.5mm, respectiv de 1.7mm. Arderea în interiorul materialului de-a lungul tăieturii are un aspect neregulat. Valorile medii ale zonei influențate termic pentru tăieturile realizate pe aceste două plăci sunt prezentate în tabelul următor.

Tabel 5.8 Evaluarea zonei influențate termic

Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Puterea medie $P$ [W]	HAZ $d$ [mm]	Încercarea	Viteza de tăiere $v$ [mm/min]	Puterea medie $P$ [W]	HAZ $d$ [mm]
1.5N1	200	180	3	1.7N1	100	180	-
1.5N2	200	157.5	3	1.7N2	100	157.5	-
1.5N3	200	135	4	1.7N3	100	135	2
1.5N4	200	112.5	3.5	1.7N4	100	112.5	2
1.5N5	200	90	3	1.7N5	100	90	3
1.5N6	150	135	3	1.7N6	50	135	-
1.5N7	175	135	4	1.7N7	75	135	-
1.5N8	200	135	4	1.7N8	100	135	2
1.5N9	225	135	4	1.7N9	125	135	3.5
1.5N10	250	135	4	1.7N10	150	135	4
1.5N11	200	135	5	1.7N11	100	135	-

Se observă că afectarea termică a fost prezentă numai pentru unele tăieturi și că zona influențată termic este asociată cu puteri scăzute și cu viteză de tăiere ridicată. În aceste condiții energia transferată materialului nu este suficientă pentru a realiza tăierea materialului, dar este transmisă în interiorul acestuia provocând arsuri neregulate.

## 5.2. Câteva aspecte ale capabilității procesului tehnologic de tăiere laser

Pentru optimizarea tehnologică a procesului de tăiere este importantă o vedere de ansamblu a tăieturilor realizate relativ la factorii de influență variați. În cele ce urmează se prezintă, pentru fiecare din plăcile pe care s-au realizat tăieturile, o grupare a tăieturilor după criteriile de calitate. Tăieturile realizate au fost clasificate în trei categorii calitative, după cum urmează:

- **tăieturi bune** – tăieturi complet penetrate, stabile de-a lungul tăieturii;
- **tăieturi acceptabile** – penetrate, relativ stabile cu afectarea termică a materialului;
- **tăieturi necorespunzătoare** – incomplet penetrate.

Domeniul experimental și clasificarea tăieturilor realizate la experimentul E2 sunt prezentate în fig 5.12 – 5.17.

Pentru grosimea de 1,5 mm, fig. 5.12, s-au obținut tăieturi acceptabile numai la viteză de tăiere mică. Se arată astfel că efectul vitezei de tăiere este mai important decât cel al puterii. Se arată că viteza de tăiere de peste 200 mm/min nu este recomandată pentru realizarea procesului de tăiere chiar dacă grosimea este mică.

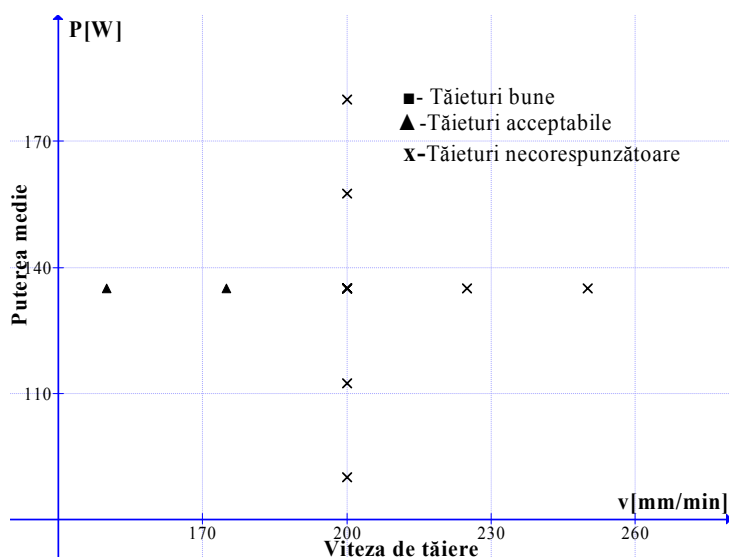


Fig. 5.12 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 1,5mm

Pentru grosimea de 1,7mm, fig. 5.13 problemele de calitate ale tăieturilor apar odată cu creșterea vitezei de tăiere. Diferența de grosime între grosimea de 1,7 și cea de 1,5mm nu a fost mare (a crescut grosimea materialului) însă valorile vitezei de tăiere pentru care se pot obține tăieturi de calitate a scăzut. Creșterea vitezei de tăiere peste 100 mm/min poate produce tăieturi cu probleme.

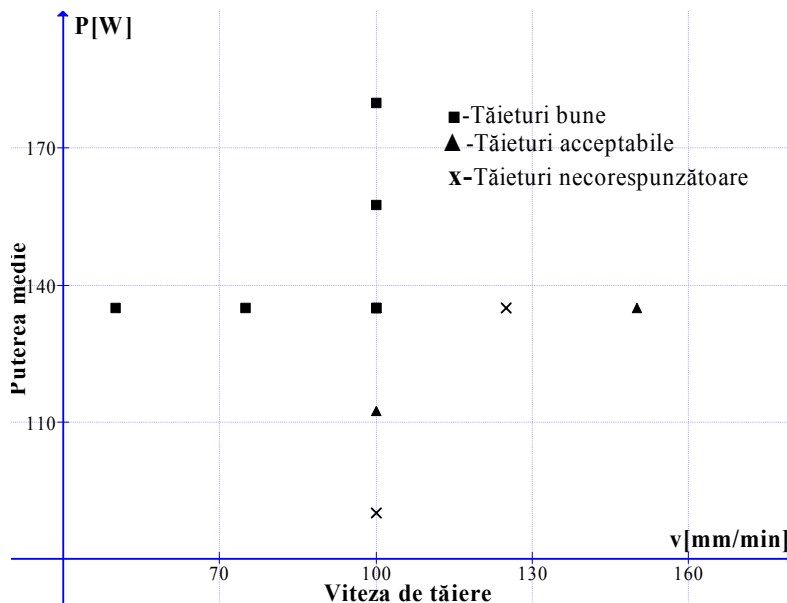


Fig. 5.13 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 1,7mm

Dacă se face abstracție de diferența de grosime între plăcile anterioare, se consideră unitar domeniul de variație pentru viteza de tăiere și se observă că începând de la viteza de 100 mm/min se produce degradarea progresivă a calității tăieturilor. Pe măsura creșterii vitezei de tăiere se trece de la tăieturi acceptabile la tăieturi cu o calitate necorespunzătoare.

În fig. 5.14 se prezintă clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 2 mm. Toate tăieturile realizate pe această placă au fost bune, având stabilitate dimensională și zonă influențată termic redusă. La această situație au contribuit viteza de tăiere scăzută și puterea ridicată. La viteze de tăiere de până la 100 mm/min s-au obținut tăieturi bune și pentru grosimea de 2 mm. Nivelul ridicat al puterii față de cel utilizat la plăcile anterioare a fost corelat cu creșterea grosimii plăcii. În acest caz o putere suficient de mare a asigurat condiții bune de realizare a tăieturilor independent de viteza de tăiere.

Pentru grosimea de 3,4 mm, fig. 5.15, toate tăieturile realizate au o calitate necorespunzătoare. După cum s-a arătat anterior, condițiile experimentale pentru această grosime nu au fost adecvate și s-au realizat numai tăieturi nepenetrante.

Pentru grosimea de 4,2 mm, clasificarea tăieturilor este prezentată în fig. 5.16. Se observă că tăieturile bune se obțin la viteză de tăiere mică. Creșterea vitezei de tăiere duce la scăderea calității tăieturii. Clasificarea tăieturilor din fig. 5.17 face posibilă o ierarhizare a efectelor în ceea ce privește calitatea tăieturilor.



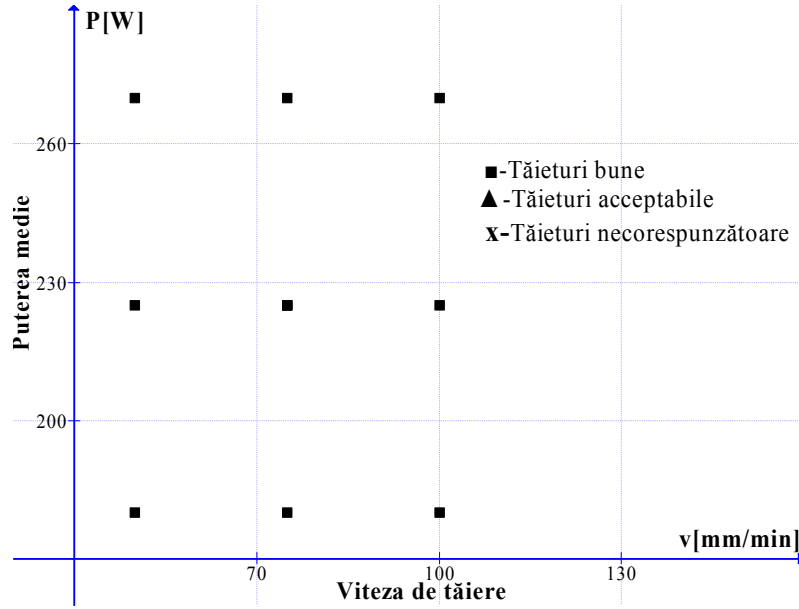


Fig. 5.14 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 2 mm

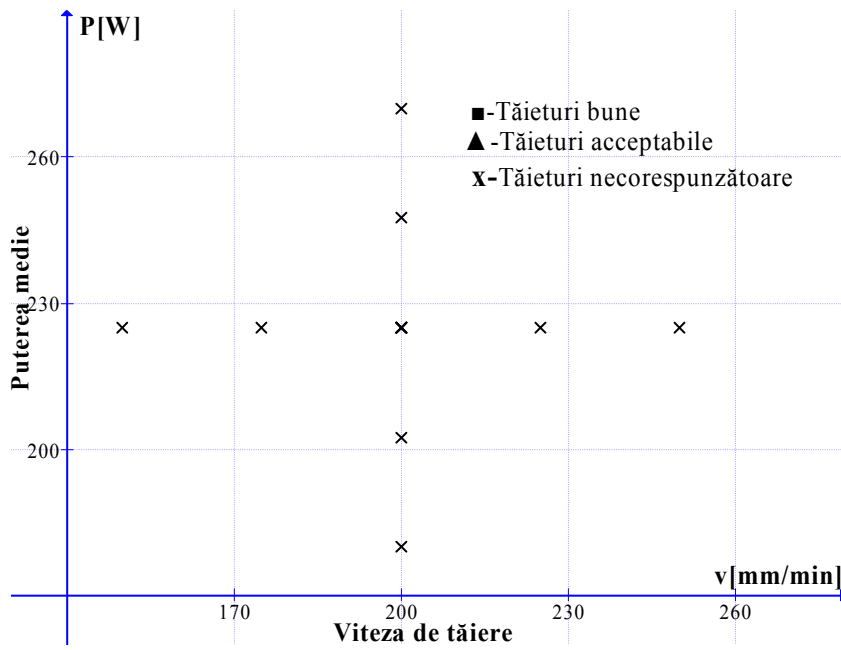


Fig. 5.15 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 3,4mm

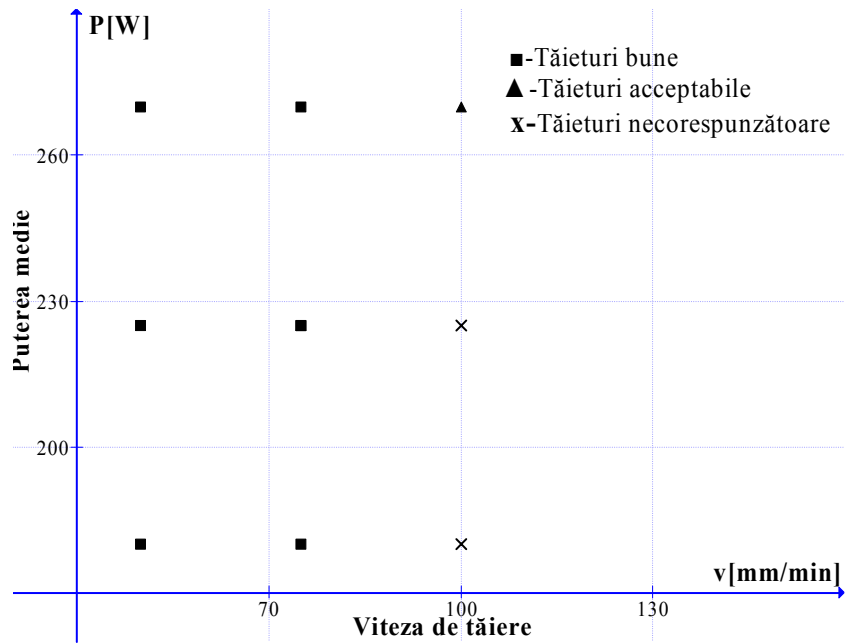


Fig. 5.16 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 4,2mm

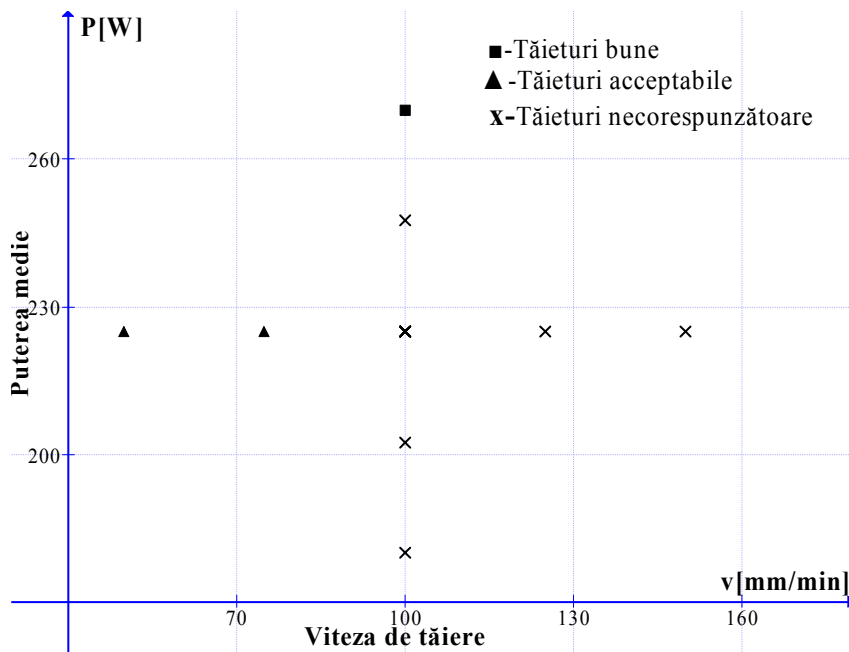


Fig. 5.17 Clasificarea tăieturilor pentru grosimea de 4,6mm

Astfel, se arată că primul efect aparține vitezei de tăiere, iar al doilea efect aparține puterii. Viteza de tăiere ridicată și puterea coborâtă duc la realizarea unor tăieturi de calitate necorespunzătoare. Creșterea grosimii, chiar dacă este însoțită de creșterea puterii și de focalizarea în interiorul piesei, necesită scăderea vitezei de tăiere. Astfel, valoarea vitezei de tăiere de 100 mm/min nu este indicată și sunt necesare valori ale vitezei de tăiere sub această valoare.

Clasificarea tăieturilor realizate pe grosimea de 4,6 mm este prezentată în fig 5.17. Se observă că, pentru această grosime, care este cea mai mare dintre cele utilizate în experiment, tăieturile bune se obțin numai la puterea maximă. Pe măsura creșterii vitezei de tăiere se trece de la tăieturi care au o calitate acceptabilă la tăieturi care au o calitate necorespunzătoare. Se arată astfel că pe măsura creșterii grosimii se trece de la tăieturi care au o calitate acceptabilă la tăieturi care au o calitate necorespunzătoare. Se arată astfel că, pe măsura creșterii grosimii devine importantă corelarea nivelului puterii cu grosimea și mai puțin important domeniul de variație a vitezei de tăiere.

Prin clasificarea tăieturilor realizate s-a efectuat o corelație între organizarea planului experimental și rezultatele procesului de tăiere. Figurile anterioare arată organizarea de tip clasic a experimentelor în care apar separat planuri experimentale în care se variază puterea și viteza de tăiere. Rezultatele obținute arată că, situațiile în care se obțin tăieturi necorespunzătoare datorită unei valori neadevate pentru viteza de tăiere sunt mai numeroase decât cele în care acest lucru se întâmplă datorită unei valori nepotrivite a puterii.

### 5.3. Concluzii parțiale

În Capitolul 5 sunt analizate probleme legate de calitatea tăieturilor realizate cu fascicul laser pentru materialul compozit CEFS.

Se arată că problemele legate de calitatea tăieturilor au o componentă măsurabilă și o componentă dată de observarea tăieturilor obținute. Principalele aspecte ale calității tăieturilor realizate se referă la stabilitatea dimensională a acestora și la lipsa afectării termice a materialului. Se discută particularități ale topografiei observate pe suprafața efectivă a tăieturilor. Acestea sunt analizate legat de fenomenele fizice care intervin la penetrarea materialului. Stabilitatea dimensională și afectarea termică au fost analizate pentru fiecare tăietură în parte. Pentru tăieturile realizate la experimentul E2 a fost realizată și o grupare după criterii de calitate a tăieturilor realizate. Se analizează efectele puterii medii și a vitezei de tăiere asupra calității tăieturilor realizate. Pentru tăieturile care au prezentat zone afectate termic extinse se prezintă o analiză a mărimii acestor zone.

## 6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

### 6.1 Concluzii finale

Abordarea proceselor de tăiere laser Nd:YAG a unor materialelor compozite cu matrice polimerică ca obiect al cercetării doctorale, a pus din start probleme de oportunitate fizică și de fezabilitate tehnologică.

Laserii Nd:YAG au cunoscut în ultimii ani o dezvoltare semnificativă, determinată de emisia radiației în infraroșu apropiat ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ), cu transmiterea fasciculelor laser prin fibră optică, în regimuri de emisie continuă și/sau pulsată. Creșterea semnificativă a puterii și ameliorarea calității fasciculului laser Nd:YAG stimulează dezvoltarea de noi și noi aplicații.

Materialele compozite cu matrice polimerică (uzual, poliester sau epoxid) și armătură filiformă (uzual, fibre din sticlă sau carbon) se caracterizează prin masă specifică redusă, proprietăți mecanice superioare, o relativ bună stabilitate în medii agresive și o deosebită elasticitate tehnologică de formare structurală și geometrică. Utilizarea lor industrială a cunoscut o continuă creștere cantitativă și calitativă, cu deplasare către domenii de vârf tehnic și tehnologic.

Cercetarea doctorală efectuată a definit și a aplicat în condiții de laborator cerințele fizice care trebuie satisfăcute pentru declanșarea și întreținerea procesului de tăiere laser Nd:YAG a unui material compozit cu matrice epoxidică. Teza de doctorat a demonstrat deci fezabilitatea procesului de tăiere investigat și i-a determinat, prin funcții obiectiv reprezentative, principalele caracteristici tehnologice și energetice. Concluziile rezultate în urma cercetării desfășurate sunt prezentate succint în cele ce urmează.

#### **6.1.1. Particularități ale tăierii laser Nd:YAG a materialelor compozite cu matrice epoxidică și armătură fibră de sticlă (CEFS)**

Principalele particularități ale proceselor de tăiere laser Nd:YAG a unor compozite cu matrice polimerică și armătură ceramică, generatoare de dificultăți în realizarea efectivă și optimizarea acestor procese, sunt :

- absorbția scăzută a energiei și slaba cuplare inițială a radiației laser Nd:YAG cu substanțele polimerice și ceramice supuse iradierii;
- structura eterogenă a materialului compozit și reacția diferită a componentelor acestuia la iradierea și încălzirea susținută de laser; de exemplu, conductivitatea și difuzivitatea termică, precum și temperaturile de transformare de fază ale matricei polimerice sunt mult

inferioare proprietăților similare ale fibrei de sticlă; ponderea fibrelor de sticlă, introduse sub formă de mat, în materialul compozit utilizat în experimentări, a fost de 75%.

- caracterul aleator și instabilitatea proceselor de transfer de energie și masă în condițiile date, favorizate de regimul pulsant al iradierii, de fenomenele de descompunere termo-chimică a matricei și de rupere termo-mecanică a fibrelor, de acțiunea jetului de gaz de lucru, insuflat coaxial cu fasciculul laser;

Pentru lungimea de undă de 1,06  $\mu\text{m}$  emisă de laserul Nd :YAG, rășina epoxidică este opacă, ceea ce face ca absorbția radiației să fie limitată la suprafața piesei, în timp ce fibra de sticlă este semitransparentă și prezintă o absorbție volumică. În aceste condiții, fezabilitatea tăierii materialului iradiat este condiționată de un nivel al intensității fasciculului laser de  $10^7 \text{ W/cm}^2$  și de un timp de interacțiune între radiația laser și material de  $10^{-3} \text{ s}$ .

Pentru procesul de tăiere laser au fost identificate două componente principale, sistemul tehnologic laser și materialul supus prelucrării. În procesul de tăiere sistemul tehnologic laser intervine prin dirijarea regimului de iradiere, prin stabilirea condițiilor de insuflare a gazului asistent și prin controlul mișcării relative dintre fasciculul laser și materialul supus tăierii. Acestea generează un mare număr de factori ce intervin în procesul de tăiere cu rol și semnificație diferită relativ, în diverse etape ale procesului. Ca factori determinanți intervin puterea medie laser pe suprafața de interacțiune fascicul laser - material și viteza de tăiere.

O tratare secvențială a procesului de tăiere laser face ca rolul acestor factori să fie corect analizat. Astfel, au fost identificate 3 etape importante ale procesului de tăiere:

- penetrarea materialului,
- stabilizarea frontului de tăiere,
- propagarea frontului de tăiere în material.

Rezultatele experimentale obținute pot fi puse în legătură directă cu penetrarea materialului și cu obținerea propagării frontului de tăiere în material.

Pentru procesul de tăiere laser este importantă modalitatea prin care are loc îndepărtarea de material din zona de tăiere. Astfel, funcție de natura materialului iradiat, există procese de tăiere laser în care îndepărtarea materialului se face într-un singur pas prin vaporizare, ablație sau descompunere chimică a materialului și procese de tăiere în doi pași, în care apare prezența fazei topite, variantă specifică tăierii laser a metalelor. Pentru procesul de tăiere laser a materialului compozit investigat (CEFS) este predominantă modalitatea de îndepărtare într-un singur pas.

Se prezintă principalele probleme legate de propagarea gazului asistent în tăietură, de asemenea, sunt prezentate fenomenele de blocare a gazului asistent la suprafața plăcii și prezența undelor de șoc utile la îndepărtarea materialului.

Studiul tăierii laser a materialelor compozite CEFS include elemente specifice tăierii materialelor polimerice și a sticlei, astfel încât nivelele pentru putere și viteză de tăiere prezentate în aceste aplicații laser reprezintă o bază de pornire pentru proiectarea tehnologiei de tăiere laser a materialului CEFS.

Pentru materiale compozite cu structură asemănătoare celui studiat au fost identificate zone și tipuri specifice de afectare termică ale materialului pe părțile interioare ale tăieturilor, la suprafață și în interiorul materialului.

### **6.1.2. Dezvoltarea procesului de tăiere laser, în condiții de iradiere laser Nd:YAG cu insufierea unui jet de gaz coaxial cu FL**

Aplicarea practică a proceselor de tăiere laser a materialului CEFS, generează numeroase probleme determinate de complexitatea, natura stohastică și dinamismul fenomenelor fizico-chimice care au loc.

Problema principală abordată la nivel teoretic, în contextul descris, a fost definirea și examinarea principială a fenomenelor termice care au loc în material și stabilirea implicării acestora în eroziunea materialului. Materialul compozit prezintă un grad ridicat de neomogenitate care nu permite aplicarea directă a ecuației căldurii, astfel problemele termice au fost considerate separat pentru rășină epoxidică și respectiv pentru fibra de sticlă. S-a aplicat modelul unidimensional al transmisiei căldurii pentru un mediu semiinfiniț, atunci când încălzirea materialului este datorată unei surse termice la suprafața materialului. Au fost reținute ca fenomene termice distincte încălzirea materialului și transformarea de stare de agregare a materialului. Discuția principală s-a purtat în jurul densității de flux termic pe care trebuie să o aibă sursa termică la suprafața materialului pentru a asigura tăierea. S-a arătat că, în condițiile experimentale utilizate, tăierea materialului are loc prin fracturarea fibrei de sticlă și arderea matricii de rășină epoxidică. Înmuiera fibrei de sticlă, urmată de topirea acesteia sunt fenomene care împiedică tăierea materialului. Sticla înmuiată nu se mai rupe, iar pentru îndepărtarea sticlei în stare topită nu este suficientă numai topirea fibrei, ci este necesară și supraîncălzirea topiturii. Pentru aceasta este necesar un nivel al intensității fascicului laser de  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>.

### **6.1.3. Reacția materialului la iradierea laser specifică proceselor de tăiere**

Studiul tăierii cu fascicul laser Nd:YAG a materialului CEFS trebuie să aibă în vedere specificitatea elementelor constitutive ale materialului compozit și anume materiale ceramice și respectiv materiale polimerice. Iradierea cu laser Nd:YAG provoacă efecte termice diferite asupra materialului, astfel că, de exemplu, rășina este opacă la radiația laser și arde, iar fibra de sticlă are o transparentă ridicată, care duce la o absorbție volumică a radiației în urma căreia fibra de sticlă se fracturează.

În acest context, în lucrare (cap.1) sunt prezentate rezultatele unor cercetări pentru tăierea laser a unor materiale ceramice (utilizarea fascicului laser pentru a realiza clivajul plăcilor de sticlă, de exemplu) și respectiv a unor materiale polimerice termorezistente. Utilizarea tăierii laser pentru aceste tipuri de materiale

furnizează un nivel orientativ al factorilor determinanți ai proceselor de tăiere laser a plăcilor de CEFS. În partea documentară a tezei, sunt prezentate, de asemenea, un număr de cercetări realizate asupra unor materiale compozite cu matrice polimerică, armate cu fibre de sticlă, similare materialului utilizat în experimente.

Cercetarea experimentală realizată se justifică prin faptul că valorile factorilor, utilizate în alte cercetări experimentale, nu pot fi direct aplicate pentru un material care are un grad ridicat de neomogenitate și prin urmare, o comportare termică anizotropă.

#### 6.1.4. Controlabilitatea și stabilitatea proceselor de tăiere laser

În ceea ce privește controlabilitatea și stabilitatea procesului de tăiere, scopul cercetării experimentale a fost identificarea regimurilor de iradiere, capabile să determine tăierea eficientă tehnologic și energetic a plăcilor de CEFS. Una din problemele deschise derivă din faptul că factorii principali care determină fenomenele fizico-chimice care au loc în material - intensitatea fasciculului laser și timpul de interacțiune - nu se regăsesc direct pe comenzile sistemului tehnologic laser. Mai mult, legătura dintre acești factori și parametrii utilizați direct în experiment devine mai dificilă în cazul folosirii regimului de iradiere pulsant. În acest caz, iradierea are loc prin suprapunerea de pulsuri consecutive, iar descrierea gradului de acoperire a spoturilor consecutive date de raportul  $\text{spo „spot overlap”}$  reprezintă un punct important în descrierea regimului de iradiere pulsant.

La nivel general, s-a demonstrat că principalii factori tehnologici ai tăierii laser: puterea (medie) laser și viteza de tăiere, controlează regimul de iradiere și implicit calitatea tăieturilor rezultate. S-a arătat că intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei (pentru aceeași durată a pulsului laser și aceeași frecvență de puls) este dată de puterea medie și de defocalizare (distanța dintre planul focal al fasciculului laser și suprafața piesei). Pentru timpul de interacțiune între radiația laser și material, la menținerea constantă a duratei pulsului, dependența este dată de viteza de tăiere și de frecvența pulsului.

În cadrul experimentelor realizate un punct de pe suprafața piesei a fost iradiat de spoturi consecutive, astfel intensitatea fasciculului laser la suprafața piesei a avut valori de  $10^7 \text{ W/cm}^2$ , iar timpul de interacțiune între radiația laser și material a avut valori de  $10^{-3} \text{ s}$  pentru încercările realizate.

La nivel experimental s-a realizat o separare clară între factorii care controlează iradierea (puterea laser, viteza de tăiere), caracteristicile pulsului laser (frecvența de pulsare) și o serie de factori specifici, la modul general, contextului în care are loc procesul de tăiere laser. În rândul ultimilor, prezintă o importanță deosebită și au fost luate în considerare grosimea materialului supus tăierii și respectiv defocalizarea suprafeței iradiate a plăcilor din CEFS.

Pentru caracterizarea funcțiilor de răspuns - indicatori de performanță - ai procesului de tăiere au fost introduse următoarele mărimi: lățimea medie a tăieturii, debitul prelucrării și energia specifică pentru îndepărtarea unității de volum de material. Planurile experimentale utilizate au ținut cont de recomandările generale și

experiența proprie privind prelucrările cu fascicul laser, astfel că s-a recurs la scăderea vitezei de tăiere odată cu creșterea grosimii plăcii. Pentru plăcile subțiri s-a utilizat focalizarea fascicului laser pe suprafața superioară a piesei, iar pentru plăcile groase, planul focal a fost deplasat în interiorul piesei. Acest lucru era necesar pentru a asigura plasarea centrului de încălzire dat de intensitatea maximă a fascicului laser spre centrul frontului de tăiere. Astfel, s-a asigurat penetrarea completă a materialului și propagarea staționară a frontului de tăiere în material. De asemenea, atunci când a fost cazul, s-a recurs la creșterea nivelului puterii medii laser cu grosimea plăcii.

### **6.1.5. Identificarea și modelarea matematică empirică a proceselor de tăiere laser**

#### **6.1.5.1. Cadrul general**

Metoda experimentelor factoriale a permis considerarea simultană a mai multor variabile. Pentru a aplica metoda experimentelor factoriale procesul tehnologic de tăiere laser a fost conceput ca un sistem cibernetic pe baza modelului intrări-ieșiri.

S-au identificat factorii care intervin în procesul de tăiere laser, pentru aceștia s-au prezentat mai multe criterii de clasificare și de asemenea s-a studiat legătura dintre factorii utilizați și fenomenele fizice asociate cu aceștia. În urma acestei analize s-au identificat ca factori principali pentru procesul de tăiere puterea laser și viteza de tăiere. Aceștia au fost asociați cu frecvența de pulsare, respectiv cu grosimea materialului și s-au realizat planuri experimentale factoriale de tip  $2^3$ . Prelucrarea datelor experimentale a fost utilizată pentru controlul și descrierea procesului de tăiere.

Au fost studiate mai multe funcții obiectiv, care pot fi clasificate în funcții obiectiv date de mărimile direct măsurate, (lățimea tăieturii la partea superioară respectiv inferioară a piesei) și funcții obiectiv care se referă la mărimi calculate și anume lățimea medie a tăieturii, debitul prelucrării și energia specifică.

Funcțiile obiectiv constituie ieșirile sistemului cibernetic, tipul de analiză realizat este unul cu răspuns multiplu.

Prelucrarea datelor experimentale realizată cu programul STATGRAPHICS a utilizat simultan mai multe elemente informaționale:

- modelarea matematică utilizând modelul matematic polinomial de gradul 2
- analiza statistică prin metoda ANOVA
- ierarhizarea efectelor prin diagrame Pareto

Analiza efectelor factorilor de influență a fost realizată pe baza diagramelor Pareto. Această analiză a avut în vedere:

- ierarhizarea efectelor
- identificarea tipului de efecte realizate / creșterea, descreșterea funcției obiectiv studiate.

Tipul de experiment factorial ales  $2^3$  a permis considerarea simultană alături de putere și viteza de tăiere a unui alt factor, și anume frecvența de pulsare,



respectiv grosimea piesei și astfel au fost studiate efectele interacțiunilor între putere, viteză și acești factori.

### **6.1.5.2. Programul experimental complex PILOT și PRINCIPAL, clasic și factorial**

Pentru controlul procesului de tăiere laser este necesară înțelegerea rolului factorilor din punct de vedere fenomenologic și tehnologic. Legătura dintre cele două aspecte creează condiții favorabile pentru abordarea problemei optimizării procesului de tăiere laser, astfel, pentru realizarea experimentelor s-au considerat factorii puterea (medie) a fasciculului laser și viteza de tăiere. Efectele termice în material cresc cu puterea și scad cu viteza de tăiere, din start cei doi factori principali au efecte contrare asupra caracteristicilor tăieturii.

Organizarea realizării experimentelor a avut două etape.

Experimentul 1, experimentul Pilot, a avut un rol pregătitor în stabilirea condițiilor experimentale, iar experimentul 2, experimentul Principal, a avut o extindere mai mare utilizând cele observate la experimentul 1. Ca obiectiv principal, controlul procesului de tăiere laser se referă la asocierea rațională a valorilor factorilor putere (medie) laser, viteză de tăiere, grosime material.

Au fost utilizate combinații între valorile factorilor putere laser și viteză de tăiere, de tip "fiecare cu fiecare". Acestea au stat la baza organizării planurilor experimentale factoriale. Seriile experimentale clasice au fost organizate pentru variația unui singur factor.

Astfel, în proiectarea cercetării experimentale s-a urmărit:

- creșterea nivelului puterii la creșterea grosimii plăcii;
- scăderea vitezei de tăiere cu grosimea plăcii;
- creșterea vitezei de tăiere cu creșterea puterii laser;

La nivel de principiu, experimentele realizate au validat aplicarea acestor criterii și pentru materialul compozit studiat.

La nivel fenomenologic s-a arătat că în procesul de tăiere are loc arderea rășinii și fracturarea fibrei de sticlă, factorul care va da aspectul calitativ al procesului fiind intensitatea fasciculului laser (la suprafața piesei). Pentru aceasta controlul este asigurat (la aceleași caracteristici ale pulsului laser) de puterea medie laser și de defocalizare (distanța între planul focal al fasciculului laser și suprafața piesei).

Pentru plăcile groase s-a focalizat în interiorul piesei la 2 mm, iar pentru cele subțiri, focalizarea a avut loc, așa cum s-a mai precizat, la suprafața piesei.

Focalizarea în interiorul piesei coboară planul focal asociat cu punctul maxim de încălzire al materialului pe frontul de tăiere și are un efect favorabil asupra propagării frontului de tăiere prin aducerea centrului de încălzire la centrul frontului de tăiere. Există, totodată, și un efect defavorabil asupra penetrării materialului prin scăderea intensității la suprafața piesei,

Utilizarea variației defocalizării reprezintă o modalitate aparte pentru controlul procesului de tăiere laser.

Pentru caracterizarea timpului de interacțiune între radiația laser și material, este importantă cunoașterea caracteristicilor iradierii în regim pulsant. Mai multe mărimi au fost definite pentru caracterizarea iradierii în regim pulsant, între care viteza de tăiere, frecvența și durata pulsului, toate caracterizează timpul de interacțiune între radiația laser și material. Acesta este dependent și de dimensiunile petei focale ale fasciculului laser, iar raportul de acoperire a spoturilor consecutive **spo** îmbină caracteristicile iradierii în regim pulsant cu cele ale deplasării relative între capul laser și materialul de prelucrat.

### **6.1.5.3. Elemente caracteristice ale calității proceselor de tăiere și tăieturilor realizate cu laser**

Evaluarea cantitativă a procesului de tăiere laser a fost realizată prin măsurarea tăieturilor la partea superioară și la partea inferioară a piesei și s-a arătat că există o corelație între valorile lățimii tăieturilor, calitatea suprafeței interioare a tăieturilor și afectarea termică a materialului. Astfel, cunoașterea valorii lățimii tăieturilor comparativ cu dimensiunile petei fasciculului laser pe suprafața piesei va da o imagine și asupra calității tăieturii.

Pentru evaluarea calității procesului de tăiere a fost necesar să se introducă mărimi care iau în considerare alături de lățimea măsurată a tăieturii și alte mărimi sensibile la variația factorilor de influență utilizați în experimente. Astfel, au fost introduse debitul prelucrării, exprimat prin volumul de material prelevat din zona de tăiere în unitatea de timp, precum și energia specifică, definită prin consumul de energie necesar pentru prelevarea unității de volum a materialului supus tăierii. Prin aceste mărimi, procesul de tăiere laser este caracterizat atât din punct de vedere tehnologic, cât și energetic. S-a demonstrat că factorul principal care poate face obiectul optimizării este viteza de tăiere. Aceasta poate fi variată în limite relativ largi cu posibilitatea de a obține tăieturi de geometrie controlată, inclusiv tăieturi complet penetrate. Productivitatea procesului de tăiere laser crește prin creșterea vitezei de tăiere, se reduce timpul de funcționare a sistemului tehnologic laser pentru realizarea unei prelucrări date și astfel scade consumul de energie.

Din punct de vedere strict al energiei consumate în procesul de tăiere, problema calității tăieturilor se formulează prin creșterea debitului prelucrării și reducerea energiei specifice.

O problemă separată pentru controlul procesului de tăiere laser o prezintă cazurile în care tăieturile obținute nu au fost penetrate complet. Pentru acestea s-a analizat profunzimea tăieturii obținute și s-a arătat că în aceste cazuri fenomenele care generează lățimea tăieturii la partea superioară nu pot fi comparate cu cazul în care tăietura este complet realizată.

De asemenea, pentru controlul procesului de tăiere laser este importantă situația opusă celei prezentate anterior și anume situația când se urmărește obținerea celor mai bune tăieturi. Pentru acest caz s-au analizat posibilitățile de a varia corespunzător viteza de tăiere.

#### **6.1.5.4. Informații punctuale, cu valabilitate locală, furnizate de programul experimental complex pentru funcțiile obiectiv relevante ale cercetării doctorale**

Pentru cercetările legate de condițiile fizice în care are loc procesul de tăiere laser se pot exprima următoarele constatări primordiale:

- tăierea laser a materialului compozit CEFS se realizează prin arderea matricii polimerice și fracturarea fibrei de sticlă;
- condițiile în care se realizează aceste fenomene sunt controlate, în principal, de puterea medie laser transmisă obiectului supus tăierii;
- înmuierea fibrei de sticlă și topirea acesteia ca fenomene induse de iradierea laser, în condiții date, pot determina:
  - reducerea posibilității de a fractura fibra de sticlă;
  - blocarea tăieturii cu depuneri de sticlă topită și resolidificată;
  - realizarea incompletă a procesului de tăiere.
- condițiile de iradiere folosite nu permit realizarea îndepărtării sticlei în stare topită;
- viteza de tăiere scăzută, în combinație cu grosimea redusă a plăcii duce la transmiterea semnificativă a căldurii prin fibra de sticlă și arderea rășinii în jurul fibrei de sticlă, rezultând zone afectate termic extinse și neregulate.

Pentru tăierea plăcilor din material compozit de tip CEFS este necesară o intensitate a fasciculului laser de ordinul  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> și o durată de interacțiune laser-material de ordinul  $10^{-3}$ s.

Referitor la valorile factorilor utilizați în programul experimental și recomandările privind selecția acestora pentru aplicații industriale, au fost dobândite următoarele informații:

- utilizarea de viteze de tăiere până la 100 mm/min face posibilă realizarea de tăieturi bune indiferent de putere, pentru domeniul de grosimi ale plăcilor utilizate în experimente, cu specificarea menținerii caracteristicilor: frecvență și durată puls;
- focalizarea fasciculului laser în interiorul piesei îmbunătățește calitatea tăieturii pentru plăcile groase.
- creșterea puterii laser odată cu grosimea plăcii, este recomandată la puteri medii laser de peste 200W.
- asocierea vitezei de tăiere de 75 mm/min cu puterea de 225 W este recomandabilă pentru realizarea tăierii complete a plăcilor din material compozit în condițiile investigate.

Aplicarea industrială a procesului de tăiere laser introduce cerințe suplimentare, între care cea mai importantă este obținerea unor tăieturi cu pereți paraleli și normali la suprafața de bază a plăcilor, care să nu mai necesite prelucrări ulterioare.

Studiul structurii materialului la marginea tăieturii a arătat prezența depunerilor de carbon (arsuri), a sticlei topite și a rupturilor în material. Pentru plăcile groase

există două zone distincte pe partea interioară a tăieturii, una la suprafața piesei și alta la partea inferioară a tăieturii. Mărimea acestor zone depinde de factorii utilizați în experimente.

La partea superioară nu există în general rupturi în material, pentru plăcile subțiri se obține arderea materialului în jurul fibrei de sticlă, ceea ce duce la afectări termice extinse.

Aprecierea tăieturilor realizate la nivel calitativ s-a realizat prin introducerea unor criterii de clasificare a tăieturilor. Prin aceasta s-a pus în evidență importanța nivelului vitezei de tăiere pentru obținerea unor tăieturi de calitate.

## 6.2. Contribuții personale

**La nivel pragmatic**, contribuțiile personale ale autorului tezei se manifestă plenar în următoarele acțiuni particulare ale cercetării doctorale:

- Aplicarea procesului de tăiere laser Nd:YAG pentru materiale compozite cu matrice polimerică și armătură din fibră de sticlă;
- Adaptarea metodelor de investigație a procesului de tăiere laser pentru condiții în care materialul supus tăierii are o structură eterogenă;
- Tratarea secvențială a procesului de tăiere laser cu evidențierea etapelor în care are loc penetrarea materialului și respectiv stabilizarea și propagarea frontului de tăiere în material;
- Determinarea factorilor care caracterizează regimul de iradiere pulsant și calculul acestora pentru situațiile prezentate de experimentele realizate.
- Separarea factorilor care controlează iradierea cu fascicul laser de factorii care caracterizează materialul și/sau ansamblul procesului de tăiere laser;
- Utilizarea unor mărimi independente unele de altele pentru a descrie procesul de tăiere laser la nivel fenomenologic și tehnologic.
- Identificarea prin modelul tăierii laser de evaporare a unui mod în care poate fi tratată la nivel teoretic tăierea laser a materialului compozit studiat și a unei clase largi de materiale compozite de același tip.
- Realizarea pe baze bibliografice a corelației între prelucrarea laser a matricei respectiv a armăturii materialului compozit, considerate ca materiale separate, în vederea stabilirii unor caracteristici termice și unor valori ale factorilor pentru tăierea laser a materialului compozit;
- Estimarea condițiilor fenomenologice în care poate fi realizată tăierea laser a unor materiale compozite cu matrice polimerică;
- Identificarea fracturării termice a fibrei de sticlă ca fenomen fizic util în realizarea tăierii laser a materialului compozit;
- Caracterizarea eficienței tehnologice și energetice a procesului de tăiere laser prin introducerea ca funcții obiectiv a mărimilor debitul prelucrării și respectiv energia specifică de tăiere;

- Identificare puterii medii laser și a vitezei de tăiere ca fiind principalii factori care controlează procesul de tăiere laser și utilizarea acestor mărimi pentru realizarea de planuri experimentale de tip clasic și respectiv factorial
- Determinarea de modele matematice ale proceselor de tăiere laser folosind funcții de regresie pentru seriile experimentale de tip clasic;
- Determinarea de modele matematice polinomiale pătratice ale proceselor de tăiere laser pentru experimentele de tip factorial;
- Procesarea datelor experimentale prin metode de investigație precum Analiza statistică a variațiilor (ANOVA), Diagrame Pareto și Suprafețe de răspuns;
- Analiza rezultatelor cercetării experimentale pentru evidențierea rolului vitezei de tăiere în optimizarea procesului de tăiere laser;
- Identificarea și aplicarea mai multor modalități de apreciere a calității tăieturilor realizate cu laser;
- Realizarea unei clasificări a calității tăieturilor realizate cu laser, utilă pentru estimarea rapidă a valorilor factorilor de influență și a domeniului optim de realizare a procesului de tăiere laser.

**Teza de doctorat** prezentată atestă îndeplinirea integrală a obiectivelor științifice și tehnologice asumate prin programul de cercetare doctorală.

Pentru continuarea cercetărilor în domeniul tăierii cu fascicul laser a materialelor compozite este nevoie, cu prioritate, de:

- Aprofundarea fenomenelor de interacțiune laser-material pentru noile tipuri de laseri (de exemplu, laseri disc) și pentru materiale compozite moderne cu diferite naturi și ponderi ale constituenților matrice și armătură;
- Inițierea și dezvoltarea unor investigații teoretice și experimentale privind optimizarea tehnologică și energetică a proceselor de tăiere laser a materialelor compozite.

# ANEXA 1

## VALORI MĂSURATE ALE LĂȚIMII TĂIETURILOR

### A1 Valori măsurate ale lățimii tăieturii, date primare ale măsurătorilor

Tabel A1.1 Valori ale lățimii tăieturii pentru experimentul E1

Nr.inc.	Valori măsurate					
	<b>B<sub>s</sub> [mm]</b>			<b>B<sub>i</sub> [mm]</b>		
	<b>D</b>	<b>M</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>M</b>	<b>F</b>
1.	0,43	0,46	0,42	0	0	0
2.	0,38	0,39	0,4	0,26	0,24	0,37
3.	0,4	0,34	0,37	0	0	0
4.	0,38	0,37	0,4	0,53	0,46	0,45
5.	0,5	0,44	0,43	0,49	0,29	0,28
6.	0,46	0,43	0,45	0,96	0,89	0,82
7.	0,8	0,79	0,77	0,57	0,45	0,44
8.	0,48	0,45	0,45	0,99	0,97	0,97
9.	0,49	0,46	0,44	0,49	0,6	0,53

Tabel A1.2 Valori măsurate pentru lățimea tăieturilor Placa1

Proba	Valori măsurate							Valori calculate				
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>i</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>i</sub>		
1,5N1	0,74	0,89	0,83	0,53	3,7 1,18	5,5 0,59	15	25	0,82	0,76	0,07 0,35	0,61; 0,96 -0,07; 1,65
1,5N2	0,69	0,73	0,62	0,47	0,95	5,3 0,89	21	35	0,68	0,77	0,05 0,26	0,61; 0,85 0,09; 1,37
1,5N3	0,71	0,65	0,72	1 0,32	3,7 0,69	4,3 0,71	5,5	9,16	0,69	0,57	0,03 0,21	0,56; 0,7 0,11; 1,15
1,5N4	0,55	0,63	0,56	0,1 0,51	0,4 0,62	0,6 0,67	1,5	2,5	0,58	0,6	0,04 0,08	0,5; 0,68 0,4; 0,78
1,5N5	0,42	0,62	0,51	0	0	0	0	0	0,51	0	0,10 0	0,02; 0,5 0,26
1,5N6	0,67	0,72	0,62	0,53	0,63	0,67	41	68,3	0,67	0,61	0,05 0,07	0,52; 0,76 0,47; 0,81
1,5N7	0,63	0,86	0,76	1,7 0,52	3,3 0,61	0,66	20	33,3	0,75	0,59	0,11 0,07	0,4; 0,94 0,5; 0,84
1,5N8	0,77	0,81	0,64	1 0,64	0,62	4,8 0,59	7	11,6	0,74	0,61	0,08 0,02	0,49; 0,87 0,64; 0,72
1,5N9	0,63	0,62	0,61	1,3 0,60	3,3 0,47	0,52	5	8,3	0,62	0,53	0,01 0,06	0,56; 0,6 0,44; 0,72
1,5N10	0,66	0,65	0,63	0,3 0,23	4,1 0,48	4,3 0,48	2	3,3	0,64	0,39	0,01 0,14	0,5; 0,54 0,18; 0,86
1,5N11	0,76	0,66	0,69	1,8 0,36	2,7 0,39	0,79	5,5	9,16	0,70	0,51	0,05 0,24	0,49; 0,73 0,02; 1,2

Tabel A1.3 Valori măsurate pentru lățimea tăieturilor Placa2

Proba	Valori măsurate							Valori calculate				
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>i</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>i</sub>		
1,7N1	0,73	0,73	0,94	0,92	0,89	0,85	60	100	0,8	0,88	0,12 0,03	0,55; 1,13 0,77; 0,91
1,7N2	0,79	0,95	0,83	0,99	0,87	0,79	60	100	0,85	0,88	0,08 0,10	0,68; 1,06 0,63; 1,11
1,7N3	0,68	0,67	0,66	0,66	0,71	0,28	59	98,3	0,67	0,55	0,007 0,23	0,6; 0,62 0,04; 1,18
1,7N4	0,59	0,75	0,69	0,75	0,40	5 0,57	33	55	0,67	0,57	0,08 0,17	0,43; 0,81 0,2; 1,04
1,7N5	0,49	0,69	0,65	0,3 0,48	4,3 0,49	5,5 0,51	6	10	0,61	0,49	0,10 0,01	0,31; 0,79 0,53; 0,57
1,7N6	0,62	0,71	0,63	0,79	0,91	0,94	60	100	0,65	0,88	0,04 0,07	0,68; 0,86 0,6; 0,94
1,7N7	0,69	0,65	0,85	1,12	0,89	0,83	59	98,3	0,73	0,94	0,10 0,15	0,6; 1,08 0,47; 1,21
1,7N8	0,71	0,67	0,76	0,79	0,56	0,62	45,5	75,8	0,71	0,65	0,04 0,11	0,59; 0,77 0,41; 0,95
1,7N9	0,58	0,65	0,71	0,9 0,57	3,4 0,69	5,3 0,46	19	31,6	0,64	0,57	0,06 0,11	0,47; 0,75 0,34; 0,88
1,7N10	0,75	0,77	0,88	1,3 0,74	0,59	0,37	22	36,6	0,8	0,56	0,07 0,18	0,51; 0,85 0,24; 1,12
1,7N11	0,54	0,53	0,69	0,87	1,04	0,87	58	96,6	0,58	0,92	0,08 0,09	0,56; 0,94 0,53; 0,97



Tabel A1.4 Valori măsurate pentru lățimea tăieturilor Placa 3

Proba	Valori măsurate							Valori calculate				
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>i</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>i</sub>		
2N1	0,62	0,57	0,54	0,92	0,88	0,99	60	100	0,57	0,93	0,04 0,05	0,66; 0,84 0,63; 0,87
2N2	0,64	0,66	0,64	0,98	1,01	0,96	60	100	0,64	0,98	0,01 0,02	0,79; 0,83 0,77; 0,85
2N3	0,69	0,65	0,69	1,06	1,07	1,03	60	100	0,67	1,05	0,02 0,02	0,82; 0,9 0,82; 0,9
2N4	0,64	0,69	0,61	1,07	0,93	0,96	60	100	0,64	0,98	0,04 0,07	0,72; 0,9 0,64; 0,98
2N5	0,61	0,59	0,63	1,06	1,06	0,99	60	100	0,61	1,03	0,02 0,04	0,78; 0,86 0,73; 0,91
2N6	0,54	0,63	0,58	0,94	1,05	1,01	60	100	0,58	1	0,04 0,05	0,7; 0,88 0,67; 0,91
2N7	0,60	0,51	0,54	0,83	1,03	0,96	60	100	0,55	0,94	0,04 0,10	0,66; 0,84 0,51; 0,99
2N8	0,58	0,42	0,61	1,08	0,91	0,86	60	100	0,53	0,95	0,10 0,11	0,5; 0,98 0,47; 1,01
2N9	0,54	0,64	0,60	1,09	0,95	1,01	60	100	0,59	1,01	0,05 0,07	0,68; 0,92 0,63; 0,97
2N10	0,61	0,52	0,64	1,07	1,06	1,01	60	100	0,59	1,04	0,06 0,03	0,68; 0,96 0,75; 0,89
2N11	0,54	0,67	0,61	1,05	1,02	0,98	60	100	0,60	1,01	0,06 0,03	0,67; 0,95 0,74; 0,88

Tabel A1.5 Valori măsurate pentru lăţimea tăieturilor Placa 4

Proba	Valori măsurate						Valori calculate					
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>I</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>I</sub>		
3,4 N1	0,88	1	0,78	0	0	0	0	0	0,88	0	0,11	0,17; 0,71 0,44
3,4 N2	0,74	0,99	0,92	0	0	0	0	0	0,88	0	0,12	0,15; 0,73 0,44
3,4 N3	0,82	1,02	0,89	0	0	0	0	0	0,91	0	0,10	0,22; 0,7 0,46
3,4 N4	0,71	0,98	0,76	0	0	0	0	0	0,81	0	0,14	0,07; 0,75 0,41
3,4 N5	0,68	0,93	0,62	0	0	0	0	0	0,74	0	0,16	-0,02; 0,76 0,37
3,4 N6	0,95	0,94	0,92	0	0	0	0	0	0,93	0	0,01	0,45; 0,49 0,47
3,4 N7	0,81	0,76	0,77	0	0	0	0	0	0,78	0	0,02	0,35; 0,43 0,39
3,4 N8	0,71	1,20	0,98	0	0	0	0	0	0,96	0	0,24	-0,11; 1,07 0,48
3,4 N9	0,76	1,02	0,87	0	0	0	0	0	0,88	0	0,13	0,12; 0,76 0,44
3,4 N10	0,84	1,18	0,81	-	-	-	0	0	0,94	-	0,20	-0,02; 0,96 0,47

Tabel A1.6 Valori măsurate pentru lăţimea tăieturilor Placa 5

Proba	Valori măsurate							Valori calculate				
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>i</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>i</sub>		
4,2 N1	1,09	0,99	1,06	1,26	1,29	1,47	60	100	1,04	1,34	0,05 0,11	1,07; 1,31 0,92; 1,46
4,2 N2	1,11	1,03	1,01	1,48	1,59	1,59	60	100	1,05	1,55	0,05 0,06	1,18; 1,42 1,16; 1,44
4,2 N3	1,02	0,98	1,17	1,25	1,23	1,43	60	100	1,05	1,3	0,1 0,11	0,94; 1,42 0,91; 1,45
4,2 N4	0,96	3,2 0,97	4,2 0,99	1,08	3,2 0,96	4,2 1,04	33,5	55,8	0,97	1,02	0,01 0,06	0,98; 1,02 0,86; 1,14
4,2 N5	1,02	1,07	1,04	1,02	1,01	1,23	60	100	1,04	1,08	0,02 0,12	1,02; 1,1 0,77; 1,35
4,2 N6	1,01	1	1,01	1,59	1,66	1,51	60	100	1	1,58	0,005 0,07	1,28; 1,3 1,12; 1,46
4,2 N7	1,02	1,01	1,01	1,34	1,41	1,46	60	100	1,01	1,40	0,005 0,06	1,2; 1,22 1,07; 1,35
4,2 N8	0,99	1,04	1,09	1,28	1,23	1,24	60	100	1,04	1,25	0,05 0,02	1,03; 1,27 1,11; 1,19
4,2 N9	1	1,03	1,04	0	0	0	0	100	1,02	0	0,02 0	0,47; 0,55 0,51
4,2 N10	1,18	1,15	1,21	1,39	1,39	1,49	60	100	1,18	1,42	0,03 0,05	1,23; 1,37 1,18; 1,42
4,2 N11	1,14	1,16	1,04	1,34	1,41	1,58	60	100	1,11	1,44	0,06 0,12	1,14; 1,42 0,99; 1,57

Tabel A1.7 Valori măsurate pentru lăţimea tăieturilor Placa 6

Proba	Valori măsurate							Valori calculate				
	B <sub>s</sub> [mm]			B <sub>i</sub> [mm]			L <sub>b</sub> mm]	P <sub>b</sub> [%]	Medii [mm]		s	± I
	1,5	3	4,5	1,5	3	4,5			B <sub>s</sub>	B <sub>i</sub>		
4,6N1	1,01	1,01	0,95	1,39	1,37	1,68	60	100	0,99	1,48	0,03 0,17	1,17; 1,31 0,82; 1,66
4,6N2	1,18	1,16	1,11	2,5 1,41	3 1,56	4,5 1,42	38	63,3	1,15	1,46	0,03 0,08	1,24; 1,38 1,12; 1,5
4,6N3	1,34	1,27	1,46	1,7 1,14	1,22	1,44	40	66,6	1,35	1,26	0,09 0,15	1,09; 1,53 0,94; 1,68
4,6N4	1,47	1,29	1,32	3,9 1,23	4,5 0,99	5,5 1,05	23	38,3	1,36	1,09	0,09 0,12	1,01; 1,45 0,94; 1,52
4,6N5	1,23	1,34	1,37	5 1,07	5,2 0,83	5,5 0,98	4,5	7,5	1,31	0,96	0,07 0,12	0,97; 1,31 0,85; 1,43
4,6N6	1,25	1,22	1,17	1,63	1,73	1,55	60	100	1,21	1,63	0,04 0,09	1,33; 1,51 1,2; 1,64
4,6N7	1,22	1,43	1,19	1,39	1,57	1,58	60	100	1,28	1,51	0,13 0,1	1,08; 1,72 1,16; 1,64
4,6N8	1,39	1,53	1,32	4,2 1,03	5 1,15	5,5 1,48	24	40	1,41	1,22	0,1 0,23	1,08; 1,56 0,75; 1,89
4,6N9	1,42	1,39	1,33	0	0	0	0	0	1,38	0	0,04 0	0,6; 0,78 0,69
4,6N10	1,68	1,67	1,68	0	0	0	0	0	1,67	0	0,005 0	0,83; 0,85 0,84
4,6N11	1,29	1,33	1,62	2,5 0,85	3,3 0,77	5,5 0,93	27,5	45,8	1,41	0,85	0,18 0,08	0,69; 1,57 0,94; 1,32

## ANEXA 2

### VALORI ALE FUNCȚIILOR OBIECTIV PENTRU EXPERIMENTUL E2

Tabel A2.1 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa1

Încercarea	Lățimea superioară Bs[mm]	Lățimea inferioară Bi[mm]	Lățimea medie Bm[mm]	Debitul prelucrării Qp [mm <sup>3</sup> /min]	Energia specifică Esp[J/mm <sup>3</sup> ]
1,5N1	0,82	0,76	0,79	210,14	51,394
1,5N2	0,68	0,77	0,73	204,4	46,551
1,5N3	0,69	0,57	0,63	146,16	55,418
1,5N4	0,58	0,6	0,59	121,54	55,537
1,5N5	0,51	0	0,26	44,72	123,119
1,5N6	0,67	0,61	0,64	140,16	57,791
1,5N7	0,75	0,59	0,67	164,15	49,345
1,5N8	0,74	0,61	0,68	176,8	46,153
1,5N9	0,62	0,53	0,58	164,43	49,689
1,5N10	0,64	0,39	0,52	104	78,640
1,5N11	0,70	0,51	0,61	162,26	50,332

Tabel A2.2 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa2

<b>Încercarea</b>	<b>Lățimea superioară Bs[mm]</b>	<b>Lățimea inferioară Bi[mm]</b>	<b>Lățimea medie Bm[mm]</b>	<b>Debitul prelucrării Qp [mm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>Energia specifică Esp[J/mm<sup>3</sup>]</b>
1,7N1	0,8	0,88	0,84	142,8	75,630
1,7N2	0,85	0,88	0,87	147,9	64,263
1,7N3	0,67	0,55	0,61	103,7	78,109
1,7N4	0,67	0,57	0,62	84,32	80,052
1,7N5	0,61	0,49	0,55	71,5	75,524
1,7N6	0,65	0,88	0,77	65,45	124,567
1,7N7	0,73	0,94	0,84	107,1	76,083
1,7N8	0,71	0,65	0,68	108,8	74,448
1,7N9	0,64	0,57	0,61	86,16	94,785
1,7N10	0,8	0,56	0,68	142,8	56,722
1,7N11	0,58	0,92	0,75	127,5	63,529

Tabel A2.3 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa3

<b>Încercarea</b>	<b>Lățimea superioară Bs[mm]</b>	<b>Lățimea inferioară Bi[mm]</b>	<b>Lățimea medie Bm[mm]</b>	<b>Debitul prelucrării Qp [mm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>Energia specifică Esp[J/mm<sup>3</sup>]</b>
2N1	0,57	0,93	0,75	75	216
2N2	0,64	0,98	0,81	121,5	133,333
2N3	0,67	1,05	0,86	172	94,186
2N4	0,64	0,98	0,81	162	83,333
2N5	0,61	1,03	0,82	123	109,756
2N6	0,58	1	0,79	79	170,886
2N7	0,55	0,94	0,75	75	144,966
2N8	0,53	0,95	0,74	111	97,297
2N9	0,59	1,01	0,8	160	67,5
2N10	0,59	1,04	0,82	123	110,429
2N11	0,60	1,01	0,81	121,5	111,801

Tabel A2.4 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa 4

Încercarea	Lățimea superioară Bs[mm]	Lățimea inferioară Bi[mm]	Lățimea medie Bm[mm]	Debitul prelucrării Qp [mm <sup>3</sup> /min]	Energia specifică Esp[J/mm <sup>3</sup> ]
3,4 N1	0,88	0	0,44	198,88	81,456
3,4 N2	0,88	0	0,44	202,4	72,776
3,4 N3	0,91	0	0,46	174,8	78,079
3,4 N4	0,81	0	0,41	127,92	96,153
3,4 N5	0,74	0	0,37	113,22	95,389
3,4 N6	0,93	0	0,47	194,58	70,126
3,4 N7	0,78	0	0,39	161,07	83,814
3,4 N8	0,96	0	0,48	245,76	54,931
3,4 N9	0,88	0	0,44	171,27	88,675
3,4 N10	0,94	0	0,47	285,52	47,281

Tabel A2.5 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa 5

Încercarea	Lățimea superioară Bs[mm]	Lățimea inferioară Bi[mm]	Lățimea medie Bm[mm]	Debitul prelucrării Qp [mm <sup>3</sup> /min]	Energia specifică Esp[J/mm <sup>3</sup> ]
4,2 N1	1,04	1,34	1,19	249,9	64,825
4,2 N2	1,05	1,55	1,3	409,5	39,560
4,2 N3	1,05	1,3	1,18	495,6	32,826
4,2 N4	0,97	1,02	1	380	35,704
4,2 N5	1,04	1,08	1,06	333,9	40,431
4,2 N6	1	1,58	1,29	270,9	49,833
4,2 N7	1,01	1,40	1,21	254,1	42,679
4,2 N8	1,04	1,25	1,15	362,25	29,943
4,2 N9	1,02	0	0,51	139,23	77,569
4,2 N10	1,18	1,42	1,3	409,5	32,967
4,2 N11	1,11	1,44	1,28	403,2	33,613

Tabel A2.6 Valori ale funcțiilor obiectiv pentru Placa 6

Încercarea	Lățimea superioară Bs[mm]	Lățimea inferioară Bi[mm]	Lățimea medie Bm[mm]	Debitul prelucrării Qp [mm <sup>3</sup> /min]	Energia specifică Esp[J/mm <sup>3</sup> ]
4,6N1	0,99	1,48	1,24	570,4	28,516
4,6N2	1,15	1,46	1,31	531,86	28,027
4,6N3	1,35	1,26	1,31	558,06	24,283
4,6N4	1,36	1,09	1,23	499,38	24,429
4,6N5	1,31	0,96	1,14	379,62	28,574
4,6N6	1,21	1,63	1,42	326,6	41,334
4,6N7	1,28	1,51	1,4	483	28,050
4,6N8	1,41	1,22	1,32	531,96	25,474
4,6N9	1,38	0	0,69	330,33	40,867
4,6N10	1,67	0	0,84	398,16	34,108
4,6N11	1,41	0,85	1,13	500,59	26,968

Tabel A2.7 Valori ale profunzimii tăieturilor parțial penetrate sau nepenetrare

Încercarea	Profunzimea tăieturii				Încercarea	Profunzimea tăieturii			
	la 1.5 mm	la 3 mm	la 4.5 mm	(media ) h [mm]		la 1.5 mm	la 3 mm	la 4.5 mm	(media ) h [mm]
1,5 N 1	1,5	1,3	1,2	1,33	3,4 N 3	2,2	1,8	1,7	1,9
1,5 N 2	1,3	1,5	1,4	1,4	3,4 N 4	1,6	1,3	1,8	1,56
1,5 N 3	1,3	1,1	1,1	1,16	3,4 N 5	1,3	1,8	1,5	1,53
1,5 N 4	1,2	0,7	1,2	1,03	3,4 N 6	2,8	2,7	2,8	2,76
1,5 N 5	0,7	0,9	1	0,86	3,4 N 7	2,6	2,3	2,2	2,36
1,5 N 6	1,5	1,4	1,5	1,46	3,4 N 8	2,3	2,9	2,5	2,56
1,5 N 7	1,3	1,4	1,5	1,4	3,4 N 9	1,3	1,8	2,1	1,73
1,5 N 8	1	1,5	1,4	1,3	3,4 N 10	2,5	2	2,8	2,43
1,5 N 9	1,1	1,2	1,5	1,26	4,2 N 4	4,2	4,2	3	3,8
1,5 N 10	0,5	1	0,9	0,8	4,2 N 9	2,6	2,8	2,8	2,73
1,5 N 11	1,2	1,3	1,5	1,33	4,6 N 2	3,3	4,6	4,6	4,06
1,7 N 4	1,7	1,2	1,2	1,36	4,6 N 3	3,6	4,6	4,6	4,26
1,7 N 5	1,2	1,2	1,5	1,3	4,6 N 4	3,8	3,8	4,6	4,06
1,7 N 8	1,7	1,4	1,7	1,6	4,6 N 5	3,7	3,2	3,1	3,33
1,7 N 9	0,7	1,7	1	1,13	4,6 N 8	3,7	3,8	4,6	4,03
1,7 N 10	1,4	1,6	1,2	1,4	4,6 N 9	3,7	3,9	3,9	3,83
3,4 N 1	2,3	1,8	2,7	2,26	4,6 N 10	3,1	3,2	3,2	3,16
3,4 N 2	2,2	2,2	2,5	2,3	4,6 N 11	4,3	4,4	4,6	4,43



Tabel A2.8 Mărimi care caracterizează înclinarea tăieturii Experimentul 2-Partea1

Încercarea	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii a grade	Încercarea	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii a grade
1.5N1	0.76	0.073	0.0029	2.29	1.7N1	0.88	0.09	0.0042	2.69
1.5N2	0.77	0.116	0.007	3.43	1.7N2	0.88	0.034	0.0006	1.01
1.5N3	0.57	0.173	0.0139	4.57	1.7N3	0.55	0.179	0.0126	4.03
1.5N4	0.6	0.033	0.0004	0.76	1.7N4	0.57	0.149	0.0087	3.36
1.5N5	0	1	0.34	18.77	1.7N5	0.49	0.196	0.0138	4.03
1.5N6	0.61	0.089	0.0035	2.29	1.7N6	0.88	0.261	0.0353	7.7
1.5N7	0.59	0.213	0.0227	6.08	1.7N7	0.94	0.223	0.0275	7.04
1.5N8	0.61	0.175	0.0152	4.95	1.7N8	0.65	0.084	0.0029	2.02
1.5N9	0.53	0.145	0.0087	3.43	1.7N9	0.57	0.109	0.0045	2.35
1.5N10	0.39	0.39	0.0651	9.46	1.7N10	0.56	0.3	0.0423	8.03
1.5N11	0.51	0.271	0.0343	7.21	1.7N11	0.92	0.369	0.0739	11.3

Tabel A2.9 Mărimi care caracterizează înclinarea tăieturii Experimentul 2-Partea2

Încercarea	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii a grade	Încercarea	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii a grade
4.2 N1	1.34	0.223	0.0159	4.08	4.6N1	1.48	0.331	0.0352	6.08
4.2 N2	1.55	0.322	0.0384	6.78	4.6N2	1.46	0.212	0.0143	3.85
4.2 N3	1.3	0.192	0.0114	3.4	4.6N3	1.26	0.066	0.0013	1.12
4.2 N4	1.02	0.049	0.0005	0.68	4.6N4	1.09	0.198	0.0116	3.35
4.2 N5	1.08	0.037	0.0003	0.54	4.6N5	0.96	0.267	0.0203	4.35
4.2 N6	1.58	0.367	0.0506	7.86	4.6N6	1.63	0.257	0.0235	5.21
4.2 N7	1.40	0.278	0.0258	5.3	4.6N7	1.51	0.152	0.0076	2.86
4.2 N8	1.25	0.168	0.0083	2.86	4.6N8	1.22	0.134	0.0055	2.36
4.2 N9	0	1	0.2428	13.65	4.6N9	0	1	0.3	16.69
4.2 N10	1.42	0.169	0.0096	3.27	4.6N10	0	1	0.363	19.95
4.2 N11	1.44	0.229	0.018	4.49	4.6N11	0.85	0.397	0.0483	6.94

Tabel A2.9 Mărimi care caracterizează înclinarea tăieturii- Experimentul 2-Partea3

Încercarea	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii $\alpha$ grade
2N1	0.93	0.387	0.0696	10.2
2N2	0.98	0.346	0.0589	9.64
2N3	1.05	0.361	0.0687	10.75
2N4	0.98	0.346	0.0589	9.64
2N5	1.03	0.407	0.0856	11.85
2N6	1	0.42	0.0882	11.85
2N7	0.94	0.414	0.0809	11.03
2N8	0.95	0.442	0.0928	11.85
2N9	1.01	0.415	0.0873	11.85
2N10	1.04	0.432	0.0973	12.68
2N11	1.01	0.405	0.0832	11.58

Tabel A2.10 Mărimi care caracterizează înclinarea tăieturii Experimentul 1

Încercarea	Viteza v [mm/min]	Frecvența f [Hz]	Puterea P [W]	Lățimea inferioară Bi[mm]	Raportul de paralelism rp [-]	Funcția rp tga	Unghiul de înclinare a tăieturii $\alpha$ grade
1	106.2	22	44	0	1	0.215	12.13
2	54	22	44	0.29	0.256	0.0128	2.86
3	106.2	25	44	0	1	0.185	10.48
4	54	25	44	0.48	0.208	0.0104	2.86
5	106.2	22	100	0.35	0.222	0.0111	2.86
6	54	22	100	0.89	0.505	0.1137	12.68
7	106.2	25	100	0.48	0.384	0.0576	8.53
8	54	25	100	0.98	0.53	0.1379	14.57
9	80.1	23.5	72	0.54	0.148	0.0059	2.29

## ANEXA 3

### TABELE PENTRU ANALIZA STATISTICĂ A VARIAȚILOR ANOVA

Tabele ANOVA pentru experimentul factorial E1

Tabel A3.1 Tabel ANOVA pentru Lățimea superioară Experimentul factorial E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(viteza)	0.01620	1	0.01620	2.00	0.2930
B( frecvența)	0.09800	1	0.09800	1.21	0.3861
C(puterea)	0.03920	1	0.03920	4.84	0.1589
AB	0.00845	1	0.00845	1.04	0.4146
AC	0.01125	1	0.01125	1.39	0.3599
BC	0.02205	1	0.02205	2.72	0.2408
Total error	0.01620	2	0.00810		
Total (corr)	0.12315	8			
$R^2 = 0.86$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.47$		

Tabel A3.2 Tabel ANOVA pentru Lățimea inferioară Experimentul factorial E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(viteza)	0.40951	1	0.40951	49.20	0.0197
B( frecvența)	0.02101	1	0.02101	2.52	0.2530
C(puterea)	0.46561	1	0.46561	55.94	0.0174
AB	0.00281	1	0.00281	0.34	0.6253
AC	0.00911	1	0.00911	1.09	0.4052
BC	0.00011	1	0.00011	0.01	0.9192
Total error	0.01664	2	0.00832		
Total (corr)	0.92482	8			
$R^2 = 0.98$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.92$		

Tabel A3.3 Tabel ANOVA pentru Lățimea medie Experimentul factorial E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(viteza)	0.06661	1	0.06661	10.18	0.0857
B( frecvența)	0.01531	1	0.01531	2.34	0.2656
C(puterea)	0.19531	1	0.19531	29.86	0.0319
AB	0.00031	1	0.00031	0.05	0.8493
AC	0.00011	1	0.00011	0.02	0.9089
BC	0.00661	1	0.00661	1.01	0.4205
Total error	0.01308	2	0.00654		
Total (corr)	0.29735	8			
$R^2 = 0.95$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.82$		

Tabel A3.4 Tabel ANOVA pentru Debitul prelucrării Experimentul factorial E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(viteza)	602.045	1	602.045	2.72	0.2406
B( frecvența)	430.417	1	430.417	1.95	0.2976
C(puterea)	509.141	1	509.141	23.04	0.0408
AB	86.329	1	86.329	0.39	0.6017
AC	613.550	1	613.550	2.78	0.2376
BC	337.740	1	337.740	1.53	0.3418
Total error	4441.957	2	220.978		
Total (corr)	7603.454	8			
$R^2 = 0.94$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.76$		

Tabel A3.5 Tabel ANOVA pentru Energia specifică Experimentul factorial E1

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(viteza)	366.257	1	366.257	1.26	0.3790
B( frecvența)	133.743	1	133.743	0.46	0.5746
C(puterea)	95.013	1	95.013	0.33	0.6312
AB	0.002	1	0.002	0.00	0.9981
AC	272.0278	1	272.0278	0.93	0.4452
BC	56.977	1	56.977	0.20	0.7059
Total error	583.414	2	291.707		
Total (corr)	1507.435	8			
$R^2 = 0.61$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0$		

## Tabele ANOVA pentru experimentul factorial E2

Tabel A3.6 Tabel ANOVA pentru Lățimea superioară Experimentul factorial E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
D(viteza)	0.00320	1	0.00320	0.13	0.7412
E( Puterea)	0.00320	1	0.00320	0.13	0.7412
F(Grosimea)	0.37840	1	0.37840	15.26	0.0174
DE	0.00045	1	0.00045	0.02	0.9007
DF	0.00180	1	0.00180	0.07	0.8036
EF	0.00020	1	0.00020	0.01	0.9337
Total error	0.09917	4	0.02479		
Total (corr)	0.48647	10			
$R^2 = 0.79$			$R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.49$		

Tabel A3.7 Tabel ANOVA pentru Lățimea inferioară Experimentul factorial E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
D(viteza)	0.19531	1	0.19531	3.60	0.1306
E( Puterea)	0.20161	1	0.20161	3.72	0.1261
F(Grosimea)	0.00151	1	0.00151	0.03	0.8772
DE	0.24851	1	0.24851	4.58	0.0991
DF	0.33211	1	0.33211	6.12	0.0686
EF	0.18301	1	0.18301	3.37	0.1401
Total error	0.21699	4	0.05424		
Total (corr)	1.37907	10			
$R^2 = 0.84$			$R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.60$		

Tabel A3.8 Tabel ANOVA pentru Lățimea medie Experimentul factorial E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
D(viteza)	0.0378	1	0.0378	2.25	0.2079
E( Puterea)	0.0630	1	0.0630	3.75	0.1248
F(Grosimea)	0.1081	1	0.1081	6.44	0.0642
DE	0.0703	1	0.0703	4.19	0.1102
DF	0.0946	1	0.0946	5.63	0.0765
EF	0.0435	1	0.0435	2.59	0.1828
Total error	0.0671	4	0.0167		
Total (corr)		10			
$R^2 = 0.86$			$R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.65$		

Tabel A3.9 Tabel ANOVA pentru Debitul prelucrării Experimentul factorial E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
D(viteza)	12232.826	1	12232.826	1.68	0.2651
E( Puterea)	16577.473	1	16577.473	2.27	0.2062
F(Grosimea)	53928.206	1	53928.206	7.39	0.0531
DE	17351.050	1	17351.050	2.38	0.1979
DF	373.296	1	373.296	0.04	0.8448
EF	14464.453	1	14464.453	1.98	0.2319
Total error	29189.008	4	7297.252		
Total (corr)	144070.315	10			
$R^2 = 0.79$			$R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.49$		

Tabel A3.10 Tabel ANOVA pentru Energia specifică Experimentul factorial E2

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
D(viteza)	4281.079	1	4281.079	24.73	0.0076
E( Puterea)	705.433	1	705.433	3.62	0.1299
F(Grosimea)	11609.298	1	11609.298	59.54	0.0015
DE	1546.708	1	1546.708	7.93	0.0480
DF	5109.139	1	5109.139	26.20	0.0069
EF	1809.522	1	1809.522	9.28	0.0382
Total error	779.927	4	194.982		
Total (corr)	26381.109	10			
$R^2 = 0.97$			$R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.92$		

## ANEXA 4

### POZIȚIA RELATIVĂ A PEREȚILOR TĂIETURII

Forma secțiunii transversale prin tăietură a fost aproximată ca fiind sub formă de trapez isoscel, așa cum s-a mai precizat și în capitolele anterioare. Pe baza acestei ipoteze se identifică două tipuri de tăieturi, tăieturi mai late la partea superioară, respectiv, tăieturi mai late la partea inferioară. Acestea sunt prezentate în fig A4.1. După desprinderea completă a pieselor tăiate, pentru prelucrările ulterioare, devine importantă forma suprafeței interioare a tăieturii, devenită acum marginea piesei. Se pune astfel pe plan secundar identificarea suprafeței superioare a piesei tăiate (cea care a fost iradiată direct de fasciculul laser) respectiv a suprafeței inferioare a piesei tăiate. Cele două suprafețe devin uneori greu de identificat dacă nu există o afectare termică semnificativă a materialului.

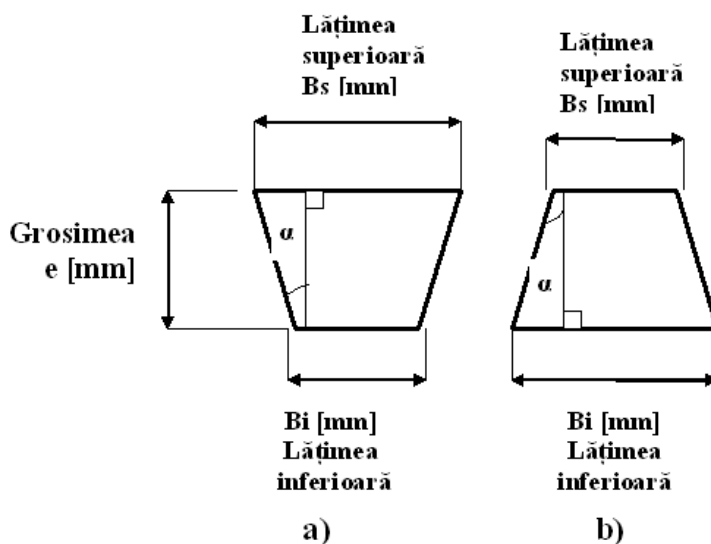


Fig A4.1. Schemă a secțiunii transversale prin tăietură a) tăietură mai lată la partea superioară, b) tăietură mai lată la partea inferioară

Caracterizarea suprafeței interioare a tăieturii, devenită marginea piesei decupate se realizează prin aprecierea înclinării față de suprafețele piesei. Mărimile introduse vor trata unitar cele două cazuri prezentate în fig A4.1. Ca elemente pentru aprecierea înclinării suprafeței tăieturii se folosesc două criterii:

- definirea înclinării suprafeței tăieturii cu considerarea grosimei piesei;
- definirea înclinării suprafeței tăieturii fără considerarea grosimei piesei.

Separarea celor două situații este necesară deoarece este dificil ca toate elementele tăieturii să fie incluse într-o singură formulă. Formulele care vor fi prezentate în cele ce urmează vor fi aplicabile numai pentru tăieturi complet penetrate. Aplicarea lor pentru tăieturi nepenetrante va descrie o situație care nu corespunde realității, deoarece pentru tăieturi nepenetrante sau incomplet penetrate forma secțiunii transversale prin tăietura se schimbă. Aceasta nu mai poate fi considerată trapez isoscel.

Înclinarea tăieturii se definește prin unghiul de înclinare a pereților tăieturii în raport cu normala la suprafața piesei. Acesta este dat de următoarea relație:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|B_s - B_i|}{e} \quad (\text{A4.1})$$

Valorile unghiului  $\alpha$  exprimat în grade se găsesc calculate în tabelele din Anexa 2. Valoarea 0 pentru unghiul  $\alpha$  desemnează o tăietură perfect dreaptă, cu muchii perpendiculare pe suprafețele piesei. Cu cât unghiul  $\alpha$  e mai mic cu atât tăietura e mai puțin înclinată și prin urmare mai bună. Același tip de variație poate fi exprimat și de  $\operatorname{tg} \alpha$ . Definirea unghiului de înclinare a tăieturii ia în considerare grosimea piesei.

Independent de grosimea piesei se introduce raportul de paralelism  $rp[-]$ . Acesta arată variația relativă a lățimii tăieturii. Raportul de paralelism se definește după următoarea relație:

$$rp = \begin{cases} 1 - \frac{B_i}{B_s} & \text{pentru } B_i \leq B_s \\ 1 - \frac{B_s}{B_i} & \text{pentru } B_i > B_s \end{cases} \quad (\text{A4.2})$$

Raportul de paralelism  $rp$  are valoarea 0 pentru tăieturi drepte, cu muchii perpendiculare pe suprafețele piesei, cu secțiunea transversală prin tăietura dreptunghi și valoarea 1 pentru tăieturi nepenetrante, închise la partea inferioară. Toate valorile acestei mărimi sunt pozitive și subunitare, cuprind între 0 și 1. Cu cât aceste valori sunt mai mari tăietura este mai înclinată. Definirea raportului de paralelism nu consideră grosimea piesei. Valorile raportului  $rp$  pentru tăieturile realizate sunt prezentate în Anexă.

În cele ce urmează se vor discuta variațiile pentru unghiul de înclinare al tăieturii și raportul de paralelism. Variația celor două mărimi a fost reprezentată grafic astfel :

- Pentru încercările realizate pe plăcile 1, 2 și 6 separat variațiile cu puterea și viteza de tăiere.
- Pentru încercările realizate pe plăcile 3 și 5, pentru o selecție a încercărilor realizate a fost reprezentată variația cu energia liniară.



Figurile următoare prezintă variațiile unghiului de înclinare a tăieturii și raportul de paralelism cu funcții de regresie. Acestea permit identificarea unor minime respectiv maxime locale ale mărimilor analizate. S-a urmarit ca funcțiile de regresie utilizate sa prezinte coeficienții de corelație ridicați.

În fig. A4.2 se prezintă variația unghiului de înclinare a tăieturii cu puterea. Se observă că pentru puteri mici se obțin înclinări relativ mari.

Pentru grosimea de 1.5 mm există o scădere importantă a grosimii tăieturii. Deși există variații relativ mari ale unghiului  $\alpha$  acestea trebuiesc privite relativ la grosimea plăcii care este foarte subțire.

Pentru grosimea de 1.7 există o grupare relativă a valorilor unghiului de înclinare  $\alpha$  pentru variația puterii. Există o scădere a unghiului de înclinare pe domeniul experimental. Se remarcă prezența unui minim la puterea de 160 W.

Pentru grosimea de 4.6mm se obțin înclinări apropiate de cele obținute pentru grosimile mici, de 1.5mm respectiv 1.7mm. Se observă că există un minim la centrul domeniului experimental. În toate cazurile analizate se observă că pe domeniul experimental valorile scăzute respectiv ridicate ale puterii produc înclinări ale tăieturii relativ ridicate în comparație cu centrul domeniului experimental.

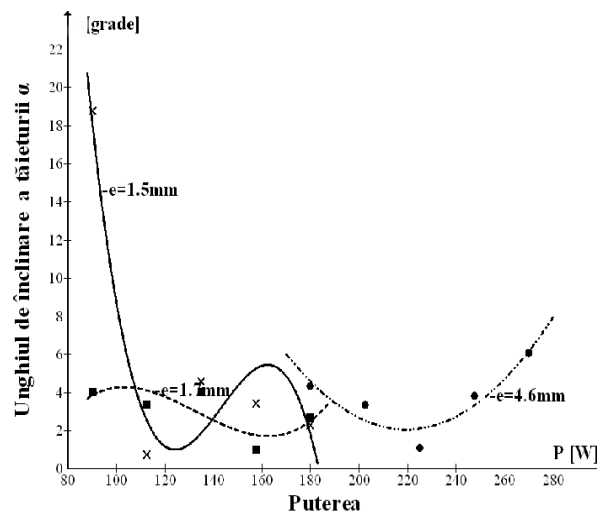


Fig A4.2. Unghiul de înclinare a tăieturii în funcție de putere

În fig. A4.3 se prezintă variația unghiului de înclinare a tăieturii în raport cu viteza de tăiere.

La grosimea de 1.5mm se observă că există o creștere a unghiului de înclinare a tăieturii cu viteza de tăiere. La centrul domeniului experimental există o zonă în care valorile unghiului de înclinare a tăieturii sunt relativ apropiate.

La grosimea de 1.7mm se observă o scădere importantă a unghiului de înclinare care are un minim la valoarea de 120 mm/min.

Pentru grosimea de 4.6mm există un minim la viteza de 80mm/min urmat de o creștere bruscă la sfârșitul domeniului experimental. Aceasta este asociată cu

apropierea de situația în care se obțin tăieturi nepenetrare. Vitezele de tăiere mici favorizează situațiile în care s-a obținut o înclinare a tăieturii relativ ridicată prin favorizarea creșterii lățimii tăieturii la partea inferioară a piesei în timp ce vitezele de tăiere ridicate favorizează creșterea lățimii tăieturii la partea superioară. Se observă că domeniul de variație al unghiului de înclinare al tăieturii pentru seriile unde s-a variat viteza de tăiere sunt mai mari decât cele unde s-a variat puterea. Variațiile unghiului de înclinare a tăieturii cu puterea și cu viteza de tăiere au arătat că atât iradierea slabă cât și iradierea în exces duc la deformarea sețiunii transversale a tăieturii.

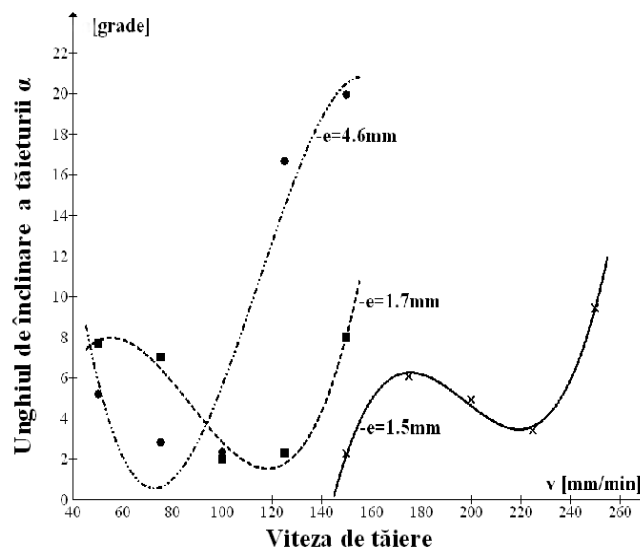


Fig A4.3. Ungiul de înclinare a tăieturii în funcție de viteza de tăiere

În fig. A4.4 se prezintă variația unghiului de înclinare a tăieturii cu energia liniară. Se observă că pentru grosimea de 2mm s-au obținut valori grupate ale unghiului de înclinare a tăieturii în jurul valorii de  $12^\circ$ . Variația cu energia liniară este mică pe domeniul experimental. Pentru această situație s-au obținut tăieturi stabile. Deși înclinarea tăieturii este relativ mare în comparație cu valorile anterior analizate aceste tăieturi s-au dovedit a fi stabile, cu afectări termice reduse.

Pentru grosimea de 4.2mm variația unghiului de înclinare al tăieturii cu energia liniară arată prezența unui minim în jurul valorii de 170 J/mm și un maxim apropiat de valoarea de 280 J/mm. Valorile obținute sunt mai mici decât cele obținute la grosimea de 2mm.

Analiza unghiului de înclinare al tăieturii cu puterea și viteza a arătat că variația acestuia pune în evidență efectele nivelului de iradiere al materialului dat de putere și de viteza de tăiere. Înclinările obținute au fost relativ reduse. Prin aceasta se arată că dacă condițiile de obținere a penetrării materialului sunt realizate înclinarea pereților tăieturii este limitată. Există o trecere rapidă de la valori relativ mari ale înclinării tăieturii (care sunt apropiate de situația în care materialul nu

poate fi penetrat) la valori mici ale unghiului de înclinare care prezintă o situație favorabilă. Astfel ca principiu variații ale înclinării tăieturii nu pot fi utilizate pentru a prezice situații în care penetrarea materialului este realizabilă.

Pentru analiza variațiilor raportului de paralelism se consideră și cazurile în care tăietura nu a fost penetrată. Astfel se integrează și această situație în variația generală a formei tăieturii.

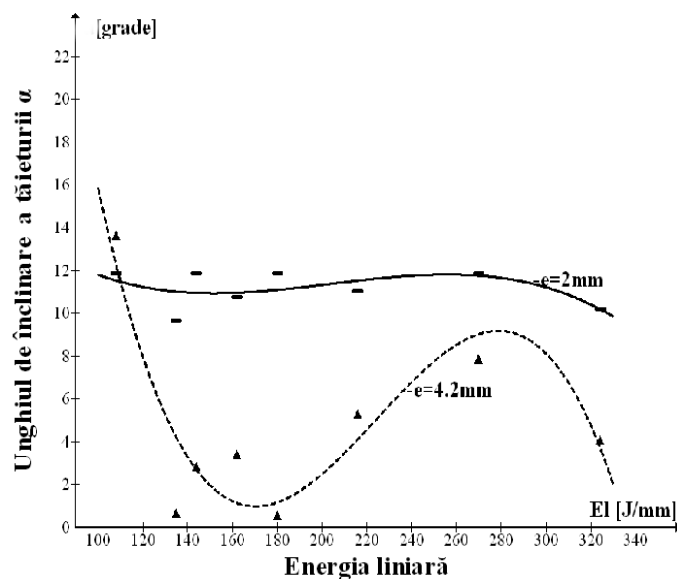


Fig A4.4. Unghiul de înclinare a tăieturii în funcție de energia liniară

În fig. A4.5 se prezintă variația raportului de paralelism cu puterea. Pentru placa de 1.5mm se observă o scădere a raportului de paralelism cu puterea. Se arată că prin creșterea puterii se obține penetrarea materialului și se obțin tăieturii drepte. La grosimea de 1.7mm se obține o scădere liniară a raportului de paralelism cu puterea. În această situație valorile obținute sunt mai grupate pe domeniul experimental.

Pentru tăieturile realizate la grosimea de 4.6 mm se observă că pe domeniul experimental se obține un minim. De asemenea valorile obținute în această situație sunt mai mari decât cele pentru situațiile anterioare. Se arată astfel că pentru plăcile mai groase secțiunea transversală prin tăietură poate fi deformată. Se arată că prin creșterea puterii raportul de paralelism crește datorită creșterii lățimii tăieturii la partea superioară.

În fig. A4.6 se prezintă variația raportului de paralelism cu viteza de tăiere. Pentru grosimea plăcii de 1.5 mm se observă că pe domeniul experimental raportul de paralelism crește cu viteza de tăiere. Această creștere este asociată cu scăderea lățimii tăieturii la partea inferioară a plăcii prin reducerea duratei de interacțiune între radiația laser și material.

Pentru grosimea de 1.7mm se obține un minim la centrul domeniului experimental în apropierea vitezei de 100 mm/min. Pentru grosimea de 4.6 mm se observă o trecere bruscă de la situația în care tăieturile au raport de paralelism scăzut la cea în care prin creșterea vitezei de tăiere se obțin tăieturi nepenetrare.

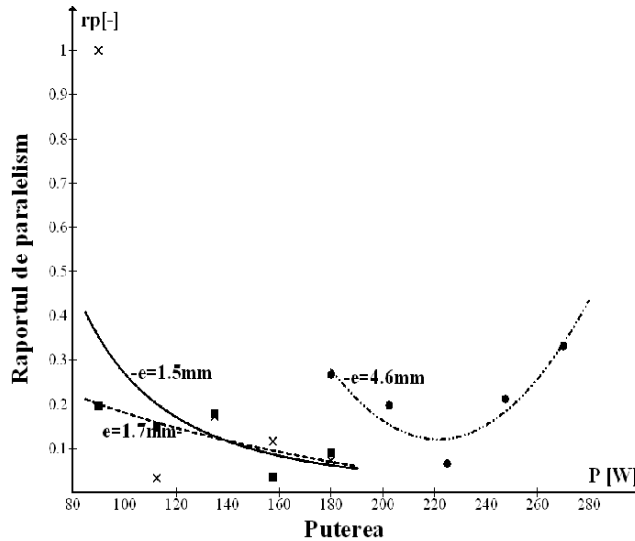


Fig A4.5. Raportul de paralelism funcție de putere

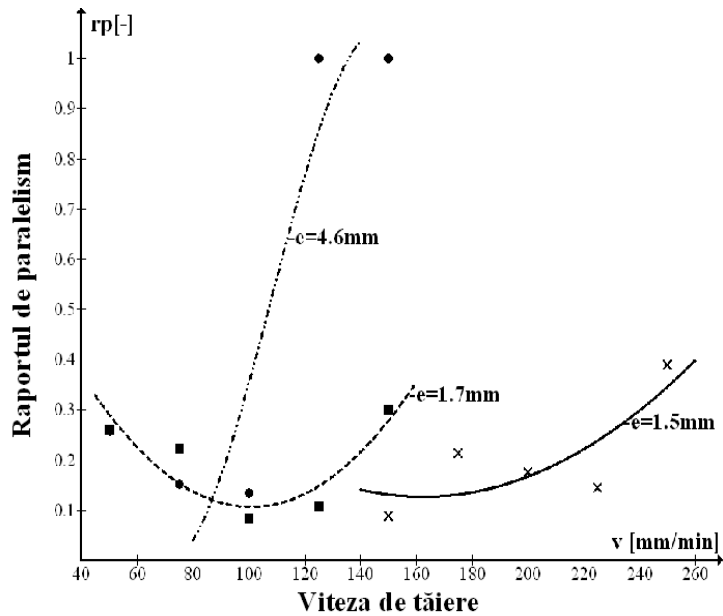


Fig. A4.6. Raportul de paralelism funcție de viteza de tăiere

În fig A4.7 se prezintă variația raportului de paralelism cu energia liniară. Pentru grosimea de 2mm se observă o grupare a valorilor raportului de paralelism în jurul valorii de 0.4, variațiile cu energia liniară sunt mici. Variații mai mari s-au obținut la începutul domeniului experimental. Pentru tăieturile realizate pe grosimea de 4.2mm se observă că la energii liniare mici se obțin tăieturi nepenetrante iar pe măsura creșterii energiei liniare are loc o scădere bruscă a valorilor raportului de paralelism arătată de minimul obținut pentru energia liniară de 175 J/mm. Creșterea următoare situează valorile raportului de paralelism de cel obținut pentru celelalte încercări experimentale. Se obține un maxim pentru valoarea energiei liniare de 280 J/mm. Variația raportului de paralelism cu energia liniară, pentru situația în care există variații importante ale formei tăieturii, nu poate explica efecte particulare generate de putere și viteza de tăiere.

Studiul variațiilor raportului de paralelism confirmă rezultatele obținute pentru variația unghiului  $\alpha$  în care pentru valori apropiate ale factorilor variații (puterea respectiv viteza de tăiere) s-au obținut tăieturi nepenetrante, respectiv tăieturi aproape drepte. S-a arătat că pentru tăierea materialului compozit valorile raportului de paralelism se află sub valoare de 0.4 odată ce condițiile pentru penetrarea tăieturii au fost realizate.

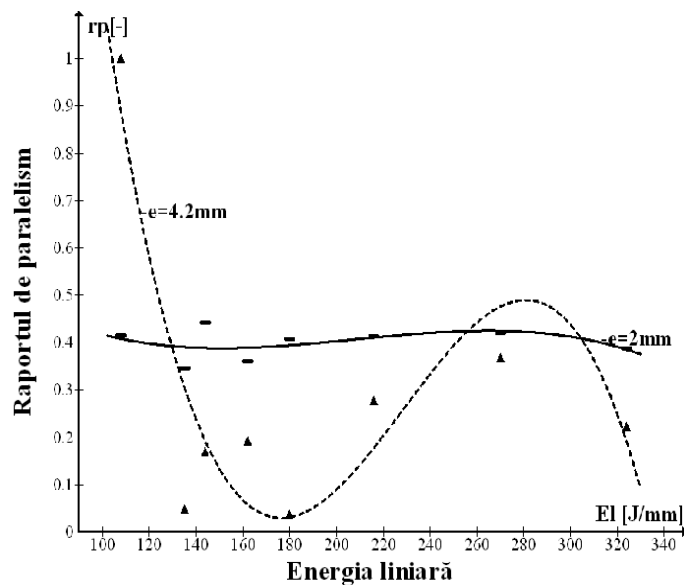


Fig. A4.7. Raportul de paralelism funcție de energia liniară

Pentru a lua în considerare grosimea piesei și diferența dintre lățimea tăieturii la partea superioară respectiv la partea inferioară a piesei se introduce funcția arbitrară  $rp \cdot tg\alpha$ . Pentru această funcție tăietura dreaptă este desemnată prin valoarea 0. Funcția a fost definită ca produsul a două funcții crescătoare pentru situația în care tăietura devine mai înclinată. Astfel pentru funcția  $rp \cdot tg\alpha$  valorile

minime vor arăta o tăietură puțin înclinată. Prin această funcție pot fi comparate tăieturi realizate pe plăci de grosimi diferite. Pentru tăieturile realizate valorile acestei funcții sunt prezentate în Anexa 2, deasemenea, valorile pentru funcția  $rp \cdot tg\alpha$  sunt prezentate în Anexa 2.

Analiza variației unghiului de înclinare a tăieturilor pentru experimentul E2 a arătat următoarele:

- Înclinarea suprafețelor interioare ale tăieturilor scade cu viteza de tăiere pentru grosimile mari.
- Înclinarea suprafețelor interioare ale tăieturilor crește cu puterea și cu viteza pentru grosimile mici.
- Pentru grosimile mici, creșterea puterii și a grosimii plăcii au un efect de creștere a înclinării suprafeței interioare a tăieturilor.
- Focalizarea fasciculului laser în interiorul plăcii a dus la scăderea generală a înclinării suprafețelor interioare ale tăieturii.

Pentru experimentul E1F, la grosimea de 2 mm s-au obținut valori ale unghiului  $\alpha$  între  $2.29^\circ$  și  $14.57^\circ$ . Există variații mari între valori, ele fiind grupate la capetele superior și inferior ale domeniului anterior amintit. Se arată că valori scăzute ale unghiului  $\alpha$  se asociază cu nivelul superior al vitezei de tăiere la putere ridicată. Valori scăzute ale unghiului  $\alpha$  se asociază cu nivelul inferior al vitezei de tăiere la putere coborâtă. Frecvența nu produce variații importante ale unghiului de înclinare a suprafeței interioare a tăieturii.

Analiza replicilor realizate au arătat variații mari ale unghiului de înclinare pentru tăieturi realizate în aceleași condiții experimentale. Ele sunt mari în comparație cu valorile mici ale unghiului de înclinare a suprafeței interioare a tăieturilor. Există însă un domeniu general de valori care se respectă pentru fiecare grosime în parte. Astfel, modelarea matematică a variațiilor unghiului  $\alpha$  cu factorii din proces nu are sens. Variațiile unghiului  $\alpha$  obținute între tăieturi sunt comparabile cu cele obținute de-a lungul tăieturilor. Prezența de rupturi pe suprafața interioară a tăieturii va duce la aspecte ale înclinării suprafeței tăieturii care nu pot fi obținute prin măsurarea tăieturilor la partea superioară, respectiv la partea inferioară a piesei.

## REFERINȚE

- [Abakians, 1998] H.Abakians, M.F.Modest, Evaporative Cutting of a Semitransparent Body With a Moving CW Laser, Transaction of the ASME, Vol. 110 November 1988 p.924-930.
- [Balteș, 2003] Balteș, L. 2003. - Materiale amorfe, materiale compozite, Universitatea Transilvania Brașov, Curs 2003.
- [Barbu, 1999] Barbu, M. 1999. - Materiale compozite din lemn, Editura LuxLibris, Brașov, 1999.
- [Berthelot, 1996] Berthelot, J. 1996. - M., - Materiaux composites, Comportament mecanique et analyse des structures, Paris, 1996.
- [Bitzel, 1998] Bitzel, H1 s.a. 1998. - The Fascinating World of Sheet Metal, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH+Co, 1998.
- [Black, 1998] I. Black - Laser cutting of perspex, Journal of materials science letters (1998) p.1531-1533.
- [Boboescu 2009] Remus Boboescu, Ion Sporea, Ramona Laslău - Analysis Method for Surfaces and Sections for Laser Welds, Revista de tehnologii neconvenționale nr.1 /2009 p. 36-41 ISSN-1454-3087.
- [Boboescu 2009b] Remus Boboescu, Ion Sporea, Ramona Laslău - Changing the Material Structure in laser welding of steel, Revista de tehnologii neconvenționale nr.2/2009 p.16-21 ISSN-1454-3087.
- [Boboescu, 2010] Boboescu, R. 2010. - Modelarea procesului de sudare laser in regim keyhole a materialelor metalice. Teză de doctorat. Universitatea Politehnica, Timișoara, 2010.
- [Caiazzo, 2005] F. Caiazzo, F. Curcio, G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO2 laser beam Journal of Materials Processing Technology 159 (2005) 279–285.
- [Carte tehnică, 124P] Cartea tehnică a instalației laser TRUMPH HL124P LCU (comandă universală), ISIM – Timișoara.
- [Carte tehnică, 304P] Cartea tehnică a instalației laser TRUMPH HL304P.
- [Chang, 2006] Chung-Shin Chang, Turning of glass–fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools, Journal of Materials Processing Technology 180 (2006) 117–129.
- [Charschan, 1993] Charschan, S. 1993. - Guide to Laser Materials Processing, Laser Institute of America, 1993.
- [Choudhury, 2010] I.A.Choudhury S.Shirley, Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation Optics & Laser Technology 42 (2010) 503–508.
- [Chryssolouris, 1991] Chryssolouris, G. 1991. - Laser machining, Theory and Practice, Springer – Verlag, New-York, 1991.
- [Cicală, 1996] Cicală, E. 1996 – Tehnologie si inginerie laser, Note de curs – studii aprofundate, Universitatea Politehnica din Timișoara, 1996.

## 200 Referinte

---

- [Cicală 2005 a] Eugen Florin Cicală, Metoda experimentelor factoriale, Editura Politehnica din Timișoara 2005.
- [Cicală 2005 b] E. Cicală, G. Duffet, H. Andrzejewski, D. Grevey, S. Ignat, Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding – operating parameters and their effects, *Materials Science and Engineering A*, Volume 395, Issues 1-2, 25 March 2005, Pages 1-9.
- [Cicală 2005 c] E. Cicală, A. Soveja, P. Sallamand, D. Grevey, J.M. Jouvard - The application of the random balance method in laser machining of metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 196, Issues 1-3, 21 January 2008, Pages 393-401.
- [Cicală, 1997] Cicală, E. 1997 – Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a materialelor. Teză de doctorat. Universitatea Politehnica, Timișoara, 1997.
- [Cicală, 1999] Cicală, E. 1999. – Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale, Ed. Politehnica Timișoara, 1999.
- [Das, 2009] Kalobaran Das, S M Kamaruzzaman, Tapas Ranjam Middya& Siddhartha Datta - Thermal diffusivity of advanced composite materials of e-glass fiber reinforced plastic in temperature range 5-120K, *Indian Journal of Pure & Applied Physics* Vol.47 April 2009, pp 273-276.
- [Dausinger, 2001] Dausinger, F. – Precise drilling with short laser pulses, University of Stuttgart, Germany, *Laserap 4*, Tome 1, Ecole CNRS – Seminaire europeen – Les hauts de Marquay – 1 au 5 octobre 2001, pag. 41-50.
- [David, 2010] David, I., Gubencu, D., Mălaimare, G. – Toleranțe și control dimensional, *Îndrumător de laborator*, Editura Politehnica Timișoara, 2010.
- [Davim, 2008a] J. Paulo Davim, Carlos Oliveira, Nuno Barricas, Marta Conceição Evaluation of cutting quality of PMMA using CO2 lasers *Int J Adv Manuf Technol* (2008) vol 35 p:875-879.
- [Davim, 2008b] J. Paulo Davim, Nuno Barricas, Marta Conceição, Carlos Oliveira Some experimental studies on CO2 laser cutting quality of polymeric materials, *Journal of materials processing technology* 198 ( 2008 ) 99-104.
- [Dhupal, 2008] D. Dhupal, B. Doloi, B. Bhattacharyya - Pulsed Nd:YAG laser turning of micro-groove on aluminum oxide ceramic (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 236-248.
- [EL – Taweel, 2009] EL – Taweel, T. A., Abdel Maaboud, A. M., s.a. – Parametric studies on the CO2 laser cutting of Kevlar – 49 composite, *Int. J. Adv. Manufact. Technol* (2009) 40 p. 907 – 917.
- [Eltawahni, 2010] H.A. Eltawahni, A.G. Olabi, K.Y. Benyounis - Effect of process parameters and optimization of CO2 laser cutting of ultra high-performance polyethylene, *Materials and Design* 31 (2010) 4029-4038.
- [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
- [Fișa tehnică] Fișa tehnică a rășinii R601 – Producător LEDA.
- [Flaum,1987] Flaum, M. and T. Karlsson, 1987, "Cutting of Fiber-Reinforced Polymers with CW CO2 laser," *SPIE-High Lasers and Their Industrial Applications*, Vol. 801(1987), pp215-227



- [Ghany, 2005] [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.
- [Grevey, 1994] Grevey, D. F. 1994 - Comparision of the performance obtained with a YAG laser cutting according to the sources operation mode, Journal of Materials Processing Technology, 1994.
- [Hilton, 2000] Hilton, P.A. 2000. - Laser materials processing in Europe - 2000 on words, International Conference of Welding, Comission IV, 2000.
- [Huang, 2010] Yongguang Huang, Shibing Liu, Wei Yang, Chengxin Yu - Surface roughness analysis and improvement of PMMA-based microfluidic chip chambers by CO2 laser cutting, Applied Surface Science 256 (2010) 1675-1678.
- [Huehnlein, 2010] K.Huehnlein, K. Tschirpke, R. Hellmann - Optimization of laser cutting processes using design of experiments, Physics Procedia 5 (2010) 243-252.
- [Ion, 2005] John C. Ion Laser Processing of Engineering Materials Principles, Procedure and Industrial Application Copyright © 2005 Elsevier Ltd. ISBN: 978-0-7506-6079-2.
- [Jackson, 2003] Jackson, M. J., s. a. - Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, Journal of Materials Processing Technology 142 (2003), 517-525.
- [Jiao, 2008] Junke Jiao, Xinbing Wang - A numerical simulation of machining glass by dual CO2-laser beams, Optics & Laser Technology 40 (2008) 297-301.
- [Jiao, 2009] Junke Jiao, Xinbing Wang - Cutting glass substrates with dual-laser beams Optics and Lasers in Engineering, 47 (2009) 860-864.
- [Jose, 1999] Jose, M., s.a - Parametric studies on pulsed laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites, Journal of Materials Processing Technology, 1999.
- [Kim 1996] Meung Jung Kim, Pradip Majmudar - Boundary element method in evaporative laser cutting, Appl. Math. Modeling 1996 ,Vol. 20 April.
- [Kim 2000] Meung Jung Kim, - Transient evaporative laser-cutting with boundary element method, Applied Mathematical Modeling 25 (2000) p: 25-39.
- [Kim 2001] Meung Jung Kim, Jingwei Zhang, - Finite element analysis of evaporative cutting with a moving high energy pulsed laser, Applied Matematical Modeling 25 (2001) p: 203-204.
- [Konig, 1985] Konig, W., C. Wulf, P. Grab, and H. Willerscheid, 1985, "Machining of Fiber Reinforced Plastics," Annals of the CIRP (1985), N2.
- [Kuo, 2008] Yen-Liang Kuo, Jehnming Lin - Laser cleaving on glass sheets with multiple laser beams, Optics and Lasers in Engineering 46 (2008) 388-395.
- [Kurt, 2009] Mustafa Kurt & Yusuf Kaynak & Eyup Bagci &Halil Demirer & Mahir Kurt, - Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics, Int. J. Adv. Manuf .Technol. (2009) 41 p:259-267.
- [Laslau 2009a] Ramona Laslău, Remus Boboescu - Analysis of specific areas on laser welds cross-sectio, Lucrările conferinței AFASES 2011 (A 13-a conferință internațională cu tema "Cercetare științifică și educație în

## 202 Referinte

---

- forțele aeriene”) , Academia forțelor aeriene “ Henri Coandă” Braşov. 2011 p: 895-900 ISSN 2247-3173.
- [Laslău 2009b] Ramona Laslău, Remus Boboescu - Laser Beam defocusing effects on laser welds, *Lucrările conferinței AFASES 2011 (A 13-a conferință internațională cu tema “Cercetare științifică și educație în forțele aeriene”), Academia forțelor aeriene “ Henri Coandă” Braşov. 2011p:901- 906, ISSN 2247-3173.*
- [Laslău 2010 a] Ramona Laslau, Remus Boboescu, Richard Herman, - Mathematical methods for description of radiation effect on evaporative laser cutting, *Buletinul AGIR nr.2-3 /2010 p:129-132.*
- [Laslău 2010b] Ramona Laslău, Richard Herman, Remus Boboescu - Characteristics of laser beam used in materials processing, *Buletinul AGIR nr.2-3 /2010 p:133-136*
- [Laslău, 2006] Laslau, R., Cicală, E. – Technologic and environmental aspects of polyester – glass fiber composites Nd:YAG laser cutting, *Scientific bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Transactions of Mechanics, Tom 51 (65), Fascicola 2, 2006, pg. 159-164.*
- [Laslău, 2012a] R. Laslău, A. Nichici, “Factors affecting the energy consumption in pulsed Nd: YAG laser cutting of Glass fiber/epoxy composite”, *Materiale Plastice, vol.49, nr. 3/2012.*
- [Laslău, 2012b] R. Laslău, A. Han, E. Cicală, A. Nichici, “L’intégration systématique de données obtenues par la méthode de plans d’expériences. Le cas de la découpe laser”, *Laserap’7, Ecole CNRS, Seminaire Europeen recherche/industrie, 1-5 octobre 2012, Ile d’Oleron, La vieille Perrotine, Gite CNRS.*
- [Mathew, 1999] Mathew, J. - Parametric studies on pulsed Nd :YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology, 1999.*
- [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, Vol. 30, pp. 497-509, 1998.*
- [Migliore, 1997] Migliore, L. – The thermal effects of laser cutting, 1997.
- [Mitsubishi, 2008] M. Mitsubishi, N. Sugita, I. Kono, S. Warisawa - Analysis of laser micromachining in silica glass with an absorbent slurry *CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 217–222.*
- [Nasedikin, 1999] Yu.V. Nasedikin, V.F. Tsarev, and Z. V. Zelenina - Cutting of Aramide fiber reinforced plastics by CO<sub>2</sub> lasers, *Mechanics of compozite materials Vol.35, No3, 1999, p: 259-264.*
- [Nichici, 1977] Nichici, A., Cicală. – Tehnologii, calitate, maşini, materiale 31 TCMM, Editura Tehnica Bucureşti, 1977, pag. 383 – 390.
- [Nichici, 1983] Nichici, A., Popovici, V. 1983. – Prelucrarea prin eroziune în construcția de maşini, Editura Facla, 1983.
- [Nichici, 1991] Nichici, A. 1991. – Fenomenologia și valențele tehnologice ale tăierii termice cu laseri, A – III – a Conferință Națională, - Realizări și perspective în domeniul laserilor și aplicațiile lor în știință și tehnologie, Timișoara, 1991, pag.141-162.

- [Nichici, 1996] Nichici, A., Cicală, E.– Prelucrarea datelor experimentale, Universitatea Politehnica Timișoara, 1996.
- [Nichici, 1996a] Nichici, A. 1996. – Procesarea materialelor prin eroziune cu laser, Note de curs, Universitatea Politehnica Timișoara, 1996.
- [Nichici, 1996b] Alexandru Nichici, Eugen Cicală, Robert Mee, Prelucrarea datelor experimentale, Universitatea Politehnica Timișoara 1996.
- [Nichici, 1997] A. Nichici - A new approach in the gas jet assisted, CO<sub>2</sub> laser cutting off line optimization, International Conference on Lasers, New Orleans, 1997.
- [Nichici, 2004a] Nichici, A. – Evoluții semnificative în sistemele tehnologice laser de procesare a materialelor, Universitatea Politehnica Timișoara, 2004.
- [Nichici, 2004b] A. Nichici – Formarea profesională în inginerie, Ieri, azi, maine, Editura Politehnica Timișoara, 2004.
- [Nichici, 2004c] Alexandru Nichici - Energii concentrate – suport al prelucrării termice a materialelor, Academia Română, Filiala Timișoara, Editura Politehnica, Timișoara, 2004.
- [Nichici, 2010] Lucrări științifice, concepere, redactare, comunicare, Editura Politehnica Timișoara, 2010.
- [Nikumb, 2005] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H.Y. Zheng, H. Qiu, D. - Low Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers, Thin Solid Films 477 (2005) 216– 221.
- [Nisar, 2009] Salman Nisar, M.A.Sheikh, Lin Li, Shakeel Safdar - Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass, Optics & Laser Technology 41 (2009) 318– 327.
- [Oliveira, 2008] J. Paulo Davim & Carlos Oliveira & Nuno Barricas & Marta Conceição - Evaluation of cutting quality of PMMA using CO<sub>2</sub> lasers, Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2008) 35:875–879.
- [Pan, 1998] C.T. Pan and H. Hocheng - Prediction of Laser-Induced Thermal Damage of Fiber Mat and Fiber MatUD, Reinforced Polymers, JMEPEG (1998) 7:751-756.
- [Pearsică, 2006] Marian Pearsică, Ștefan Nedelcu, Doru Luculescu, - Metode de modelare a procesului de prelucrare cu laser, Editura Albastră Cluj –Napoca 2006.
- [Pietro, 1994] Pietro, P. DI., Yao, Y. L.– An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality – a review, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 34, Nr.2, 1994, pp. 225 – 243.
- [Popedcu, 1999] Popedcu, N., Saban, R., s.a. – Știința materialelor pentru Ingineria Mecanică. Materiale Comerciale, Metalice, Nemetalice si Compozite, Editura Fair Parteners, Bucuresti, 1999.
- [Ream, 2004] Ream, Stanley L. 2004. – Laser welding efficiency and cost: CO<sub>2</sub>, YAG, Fiber, and disc, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004.
- [Ready, 1997] John F. Ready - Industrial Applications of Lasers (Second edition), 1997 Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-583961-7.
- [Rykalin, 1978] N. Rykalin, A. Uglov and A. Kokora Laser Machining and Welding Mir Publishers Moscow, 1978.

## 204 Referinte

---

- [Rofin – Sinar, 1998] Rofin – Sinar, - Introduction to industrial laser materials processing, Hamburg, 1998.
- [Steen, 2003] Steen, W.N. - Laser material processing – an overview, Y. Opt. A: Pure Appl. Opt. 5 (2003), S<sub>3</sub> – S<sub>7</sub>.
- [Stefanescu, 1998] Stefanescu, F., Neagu, G., Mihai, A. - Materialele viitorului se fabrica azi. Materiale compozite. E. D. P., Bucuresti, 1998.
- [Tagliaferri, 1985] Tagliaferri, V., A. Di Ilio, and I. Crivelli Visconti, 1985, "Laser cutting of Fiber-Reinforced Polyesters," Composites, Vol. 16, No. 4, pp317-326.
- [Tuersley, 1998 a] Tuersley, J. P. Nd – YAG laser machining of SiC fibre / borosilicate glass composites. Part I. Optimisation of laser pulse parameters, Composites Part A 29 A – 1998, p. 947 – 954.
- [Tuersley, 1998 b] Tuersley, J, P.– Nd YAG laser machining of glass composites. Part II. The effect of process variables, Elsevier Science Ltd., 1998.
- [Ursu, 1986] [Ursu, 1986]-I.Ursu, I.N. Mihăilescu, A.M. Prokhorov, Interacțiunea radiației laser cu metalele, ed. Academiei R.S.R, București 1986
- [Wang, 2007] Yu-Zan Wang, Jehnming Lin Characterization of the laser cleaving on glass sheets with a line-shape laser beam, Optics & Laser Technology 39 (2007) 892–899.
- [Yamamoto, 2010] Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita, Etsuji Ohmura - Influence of thermal expansion coefficient in laser scribing of glass, Precision Engineering 34 (2010) 70–75.
- [Yang, 2010] L.J. Yang, Y.Wang, Z.G.Tian, N.Cai - YAG laser cutting soda-lime glass with controlled fracture and volumetric heat absorption, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 849–859.
- [Yu, 1997] L.M.Yu, - Three-Dimensional Finite Element Modeling of Laser Cutting, Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) p: 637-639.
- [Yung, 2007] Winco K.C., Yung, Jun Wu, T.M. Yue, B.L. Zhu, C.P. Lee - Nd:YAG laser drilling in epoxy resin/AlN composites material Composites: Part A 38 (2007) 2055–2064.
- [Zgura, 2000] Zgura, G., Severin, I., Tonoiu, I. - Materiale compozite cu matrice metalică. Tehnologii de prelucrare, Ed. Academiei Romane, Bucuresti, 2000.
- [Zhang, 1998] Zhang, X.– 500 W Pulsed Laser Processing Technology and Application, International Conference of Welding, Comission IV, 1998.
- [columbia.edu] <http://www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/ntm/Chapter1.html>
- [\*\*\*1] [http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-composite-fibers-d\\_1226.html](http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-composite-fibers-d_1226.html) (10.07.2012)
- [\*\*\*2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Glass-reinforced\\_plastic](http://en.wikipedia.org/wiki/Glass-reinforced_plastic) (10.07.2012)
- [\*\*\*3] <http://ro.wikipedia.org/wiki/modelul-unui-sistem> (10.07.2012)
- [\*\*\*4] <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=764>(10.07.2012)
- [\*\*\*5] <http://www.matbase.com/material/fibres/glass/e-glass-fibre/properties>(10.07.2012)
- [\*\*\*6] [http://www.muehlmeier.de/assets/pdf/composite/muehlmeier\\_en\\_e-cr\\_vs\\_e-glass.pdf](http://www.muehlmeier.de/assets/pdf/composite/muehlmeier_en_e-cr_vs_e-glass.pdf) (10.07.2012)