

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ

ing. Eugen Florin Cicală

OPTIMIZAREA PROCESELOR DE  
TAIERE CONTURATA CU LASER  
A MATERIALELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

CONDUCATOR ȘTIINȚIFIC  
prof. dr. ing. ALEXANDRU NICHICI

1997

618 482  
366 A

BUPT

# CUPRINS

	<b>pagina</b>
<b>Notații abrevieri si simboluri</b>	<b>4</b>
<b>Cap.1. Introducere</b>	<b>6</b>
<b>Cap.2. Fenomenologia tăierii materialelor cu fascicule laser CO<sub>2</sub> cw</b>	<b>11</b>
2.1. Caracterizarea fasciculelor laser CO <sub>2</sub> cw utilizate la tăierea materialelor	11
2.1.1. Fasciculele laser ca agenți erozivi	11
2.1.2. Diametrul fasciculelor laser	13
2.1.3. Divergența fasciculelor laser	17
2.1.4. Calitatea fasciculelor laser	18
2.1.5. Strălucirea fasciculelor laser	20
2.1.6. Stabilitatea fasciculelor laser	21
2.2. Absorbția de către materiale a radiației laser CO <sub>2</sub> cw	22
2.3. Încălzirea materialelor ca urmare a absorbției radiației laser	28
2.3.1. Ecuația conducției termice	28
2.3.2. Soluții particulare ale ecuației conducției termice	33
2.4. Formarea frontului de eroziune la tăierea materialelor cu laseri	38
2.4.1. Localizarea procedeelelor de tăiere laser analizate	38
2.4.2. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin topire si vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru	39
2.4.3. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin oxidare, topire si vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv	44
2.4.4. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin descompunere termochimică	46
2.5. Concluzii	46
<b>Cap.3. Modelarea analitică a tăierii materialelor cu fascicule laser CO<sub>2</sub> cw</b>	<b>48</b>
3.1. Factori de influență si funcții obiectiv la modelarea tăierii laser a materialelor	48
3.2. Ipoteze si ecuații fundamentale pentru modelarea analitică a tăierii laser	52
3.3. Model analitic al tăierii laser prin topire si vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru	57
3.3.1. Stabilirea dependenței analitice între $b_m$ si parametrii $P_L$ , $s$ si $v$	57
3.3.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere si grosimii materialului tăiat	59
3.3.3. Calculul grosimii sfatului de material topit	62
3.4. Model analitic al tăierii laser prin oxidare, topire si vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru reactiv	67
3.4.1. Stabilirea dependenței analitice între $b_m$ si parametrii $P_L$ , $s$ si $v$	67
3.4.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere si grosimii materialului tăiat	72
3.5. Model analitic al tăierii laser prin descompunere termochimică	75

3.5.1. Stabilirea dependenței analitice între $b_m$ și parametrii $P_L$ , $s$ și $v$	75
3.5.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere și grosimii materialului tăiat	79
3.6. Model analitic general de stabilire a dependenței între $b_m$ și parametrii $P_L$ , $s$ și $v$	81
3.7. Concluzii	83
<b>Cap.4. Modelarea experimentală în vederea optimizării tăierii materialelor cu fascicule laser CO<sub>2</sub> cw</b>	84
4.1. Structurarea experimentelor de modelare a tăierii cu laseri CO <sub>2</sub> cw	84
4.2. Prezentarea instalației de experimentare utilizate	87
4.3. Ierarhizarea prin bilanț aleator a factorilor de influență	95
4.3.1. Metoda bilanțului aleator	95
4.3.2. Ierarhizarea factorilor de influență la tăierea laser a <b>PMMA</b> . (Experimentul 1)	96
4.3.2.1. Proiectarea și realizarea experimentului	96
4.3.2.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor și concluzii	99
4.3.3. Ierarhizarea factorilor de influență la tăierea laser a <b>OL</b> . (Experimentul 2)	103
4.3.3.1. Proiectarea și realizarea experimentului	103
4.3.3.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor și concluzii	105
4.4. Modelarea prin experiment factorial complet a tăierii cu laseri CO <sub>2</sub> cw	110
4.4.1. Aplicarea metodei experimentului factorial complet la modelarea tăierii laser	110
4.4.2. Modelarea tăierii laser a <b>PMMA</b> . (Experimentul 3)	112
4.4.2.1. Proiectarea și realizarea experimentului	112
4.4.2.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor	116
4.4.2.3. Concluzii și posibilități de optimizare	126
4.4.3. Modelarea tăierii laser a <b>OL</b> . (Experimentul 4)	135
4.4.3.1. Proiectarea și realizarea experimentului	135
4.4.3.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor	138
4.4.3.3. Concluzii și posibilități de optimizare	152
<b>Cap.5. Algoritm general pentru modelarea tăierii laser în scopul optimizării tehnologiei</b>	156
<b>Cap.6. Concluzii finale și contribuții originale</b>	159
<b>Bibliografie</b>	163
<b>Anexe</b>	171
Anexa 1. Determinarea fracțiunii $\eta$ din secțiunea fasciculului laser care contribuie efectiv la încălzirea materialului	171
Anexa 2. Stabilirea semnificației statistice a influenței culorii PMMA asupra lățimii tăieturilor executate cu laseri CO <sub>2</sub> cw	174
Anexa 3. Programe-sursă ale comenzii numerice NUM 750 folosite în vederea realizării experimentelor 1 și 2	177
Anexa 4. Programe-sursă ale comenzii numerice NUM 750 folosite în vederea realizării experimentelor 3 și 4	181

## NOTAȚII, ABREVIERI ȘI SIMBOLURI

### a. Notatii:

- ✓ - caractere înclinate (*italics*), pentru mărimile care intervin în relații de calcul;
- caractere întărite (**bold**), pentru abrevierile termenilor utilizați repetat;
- caractere întărite și subliniate (**bold + underline**), pentru mulțimi;
- paranteze, pentru referirea în text la relații de calcul;
- unități de măsură în SI, pentru fiecare relație de calcul;
- unitățile de măsură folosite în practică, pentru valorile numerice ale parametrilor;

### b. Abrevieri:

<b>cw</b> ⇒ undă continuă; /	<b>OL</b> ⇒ oțel carbon;
<b>DS</b> ⇒ diametrul spotului; /	<b>OP</b> ⇒ obiect de prelucrat; /
<b>FE</b> ⇒ front de eroziune;	<b>PF</b> ⇒ pată focală; /
<b>FI</b> ⇒ factori de influență; /	<b>PMMA</b> ⇒ polimetilmetacrilat;
<b>FL</b> ⇒ fascicul laser; /	<b>SL</b> ⇒ spot laser;
<b>FO</b> ⇒ funcții obiectiv;	<b>TL</b> ⇒ tăiere laser; /
<b>FT</b> ⇒ front de topire;	<b>ZF</b> ⇒ zonă focală.

### c. Simboluri

Deoarece definirea tuturor simbolurilor utilizate se face în textul tezei de doctorat în momentul introducerii lor, am considerat că este necesară precizarea în lista de mai jos doar a acelor simboluri la care se fac referiri și în alte paragrafe decât cele în care au fost introduse:

$A(x,y,z,t)$ [-]	⇒ absorbivitatea materialului <b>OP</b> ;
$b$ [m]	⇒ lățimea tăieturii la partea inferioară;
$B$ [m]	⇒ lățimea tăieturii la partea superioară;
$b_m$ [m]	⇒ lățimea medie a tăieturii;
$C$ [J/kg·K]	⇒ capacitatea calorică a materialului <b>OP</b> ;
$f$ [m]	⇒ distanța focală a lentilei;
$I(x,y,z)$ [W/m <sup>2</sup> ]	⇒ intensitatea radiației;
$I_A(x,y,z)$ [W/m <sup>2</sup> ]	⇒ componenta absorbită a intensității radiației;
$K$ [W/m·K]	⇒ conductivitatea termică a materialului <b>OP</b> ;
$K_0$ [-]	⇒ funcția Bessel de speța a doua și ordinul zero;
$M^2$ [-]	⇒ factorul de calitate al <b>FL</b> ;



$P_C$ [W]	⇒ puterea câștigată pe <b>FE</b> ;
$P_{CT}$ [W]	⇒ puterea pierdută prin conducție termică în <b>OP</b> ;
$P_I$ [W]	⇒ puterea necesară încălzirii și topirii (vaporizării) <b>OP</b> ;
$P_L$ [W]	⇒ puterea <b>FL</b> ;
$s$ [m]	⇒ grosimea <b>OP</b> ;
$T_T$ [K]	⇒ temperatura de topire a materialului <b>OP</b> ;
$T_V$ [K]	⇒ temperatura de vaporizare a materialului <b>OP</b> ;
$T_0$ [K]	⇒ temperatura inițială a <b>OP</b> ;
$v$ [m/s]	⇒ viteza relativă <b>FL-OP</b> ;
$x$ [m]	⇒ coordonată;
$y$ [m]	⇒ coordonată;
$z$ [m]	⇒ coordonată;
$\gamma$ [rad]	⇒ unghiul dintre <b>FE</b> și <b>FL</b> ;
$\eta$ [-]	⇒ secțiunea din <b>FL</b> utilizată efectiv la încălzirea <b>OP</b> ;
$\kappa$ [m <sup>2</sup> /s]	⇒ difuzivitatea termică a materialului <b>OP</b> ;
$\lambda$ [m]	⇒ lungimea de undă a radiației;
$\lambda_T$ [J/kg]	⇒ căldura latentă de topire a materialului <b>OP</b> ;
$\lambda_V$ [J/kg]	⇒ căldura latentă de vaporizare a materialului <b>OP</b> ,
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	⇒ densitatea materialului <b>OP</b> ;
$w(z)$ [m]	⇒ raza convențională a <b>FL</b> ideal;
$w_R(z)$ [m]	⇒ raza convențională a <b>FL</b> real;
$w_0$ [m]	⇒ raza minimă a <b>FL</b> ideal;
$w_{0R}$ [m]	⇒ raza minimă a <b>FL</b> real.

## CAPITOLUL 1

### INTRODUCERE

Tăierea materialelor de interes industrial, inclusiv pentru construcția de mașini, reprezintă actualmente unul dintre domeniile cele mai eficiente și, în consecință, cele mai largi de aplicare a sistemelor de prelucrare cu fascicul laser (**FL**), datorită diversității materialelor ce se pot prelucra, gamei de grosimi și viteze de tăiere utilizate [19],[70],[85].

Laserii cu CO<sub>2</sub> sunt de departe cei mai utilizați la tăierea materialelor datorită construcției lor relativ simple, a siguranței în funcționare și a randamentului lor ridicat în comparație cu alte surse laser. De aceea, de pildă în 1996, din totalul de 18387 de surse laser vândute pentru procesarea materialelor, 5476 au fost cu CO<sub>2</sub> (iar valoric au depășit 40% din cifra totală de afaceri), dintre care aproximativ 82% sunt utilizate pentru operații de tăiere [4],[5],[46],[47],[50],[52],[55],[75],[125].

Între problemele de mare actualitate la tăierea cu laseri (**TL**) se află și optimizarea tehnologiei [18],[39],[76],[80],[82]. Pentru abordarea acestei probleme este necesară existența unor modele (generale și/sau particulare) care să permită stabilirea valorilor optime ale mărimilor de intrare (factori de influență ⇒ **FI**) în condiții date, în scopul obținerii celor mai bune valori ale mărimilor de ieșire (funcții obiectiv ⇒ **FO**).

Deși literatura de specialitate abundă în informații privind **TL**, acestea sunt de cele mai multe ori incomplete, confuze sau chiar contradictorii. Cel mai frecvent se întâlnesc trei categorii de informații tehnologice:

- tabele și grafice cu valori ale unor **FO** (cel mai adesea viteza maximă de tăiere) funcție de câțiva **FI** (de regulă, puterea laser și grosimea obiectului supus tăierii (obiect de prelucrat ⇒ **OP**), întâlnite cu precădere, dar nu numai, în prospectele comerciale ale diferitelor firme producătoare de utilaje laser; aceste date au un caracter informativ și sunt prezentate în scopul caracterizării comerciale a diferitelor echipamente de prelucrare prin prisma performanțelor acestora [24],[128].

- modele matematice analitice ale **TL**, care oricât ar fi de sofisticate, nu pot furniza valori ale **FO** efectiv utilizabile în practică și aceasta datorită complexității fenomenelor ce apar la **TL**, imposibil de cuprins în întregime în ecuații analitice; pe de altă parte, aceste modele analitice furnizează prea puține date despre unele **FO** interesante din punct de vedere tehnologic, cum este, de exemplu, paralelismul pereților tăieturii; în plus, unele modele analitice (și tocmai cele mai fidele) sunt dificil de aplicat datorită complexității calculelor pe care le presupun [49],[72],[114];

- modele empirice ale **TL** care sunt obținute în cele mai multe cazuri în urma unor experimente laborioase, dar prezintă posibilități extrem de reduse de generalizare, aplicabilitatea lor fiind practic limitată la materialul și domeniul **FI** explorat pe cale experimentală [59],[124].

Ca urmare, se constată că, în ciuda mulțimii datelor existente, acestea pot fi cu greu integrate într-un sistem coerent care să permită formularea unui algoritm de urmat în vederea obținerii unor concluzii utile privind parametrii tehnologici optimi pentru **TL** a unui anumit material. Dificultățile sunt amplificate de lipsa unor definiții riguroase, univoce a **FI** și a **FO** pentru **TL**, ceea ce împiedică evaluarea obiectivă a performanțelor realizate și compararea echipamentelor tehnologice concurente. Acestea sunt motivele principale pentru care **TL** rămâne în continuare un domeniu deschis pentru abordare teoretică și experimentală.

Teza de doctorat își propune ca obiectiv final prioritar optimizarea după criterii de productivitate și/sau calitate a tehnologiei **TL** a materialelor. Pentru aceasta este necesară în prealabil identificarea unor modele matematice ale **TL** și apoi găsirea, cu ajutorul acestora, a domeniilor ce satisfac cerințele formulate prin intermediul **FO** adoptate.

În contextul celor prezentate mai sus, prin studiul literaturii de specialitate și pe baza experienței tehnologice acumulate nemijlocit în **TL**, autorul a ajuns la concluzia că atingerea obiectivului menționat, utilizând doar modele analitice este inefficientă, ținând cont de complexitatea fenomenelor ce trebuie puse în evidență, de timpul de calcul necesar, de mărimea memoriei de calculator ce trebuie alocată precum și de diversitatea problemelor de abordat.

Pe de altă parte, stabilirea exclusiv empirică a regimurilor optime ale **TL** este, de asemenea, laborioasă, scumpă, energo- și cronofagă și conduce adesea la rezultate nesatisfăcătoare pentru cerințele practicii tehnologice moderne.

De aceea, alegerea (cel puțin orientativă) a valorilor **FI**, pornind de la care optimizarea se poate obține în continuare experimental, este calea cea mai rațională de urmat și se parcurge pornind de la un model analitic relativ simplu, bazat pe mecanismul care generează formarea frontului de eroziune (front de eroziune  $\Rightarrow$  **FE**) la **TL** a materialelor.

Din aceste motive, structura logică pe baza căreia a fost construită teza de doctorat este următoarea:

**a)** analiza fenomenelor prin care are loc **TL**, cu scopul de a permite formularea ipotezelor și scrierea ecuațiilor de echilibru necesare elaborării modelelor analitice; acest lucru implică:

- definirea corectă și completă a **FL** ca agent eroziv utilizabil la tăierea materialelor;

- prezentarea mecanismului prin care are loc încălzirea materialului sub acțiunea radiației laser, culminând cu fenomenologia formării **FE**, pentru diferite cazuri particulare prin care **TL** poate avea loc;

- evidențierea, acolo unde este cazul, a căilor de obținere de rezultate optime ale **TL** prin : minimizarea diametrului **FL** în zona focală, maximizarea coeficientului de absorbție al **OP**, etc.;

Aceste aspecte formează subiectul capitolului 2 al tezei și reprezintă o sinteză bibliografică, structurată și prezentată într-un mod original, astfel încât să corespundă scopului final propus.

**b)** dezvoltarea unor modele analitice suficient de fidele, dar în același timp relativ simplu de aplicat ale **TL** a materialelor, cu ajutorul cărora să se determine prin calcul valori ale **FI** adecvate pentru realizarea modelării experimentale; aceasta implică:

- alegerea și definirea **FO**, identificarea **FI**, precum și formularea ipotezelor și ecuațiilor fundamentale pentru elaborarea modelelor analitice;

- scrierea modelelor analitice pentru cele trei situații caracteristice abordate în teză și care sunt și cele mai frecvent întâlnite procedee de **TL** a materialelor:

- **TL** prin topire și vaporizare limitată a materialului, în prezența unui gaz de lucru neutru;

- **TL** prin oxidare, topire și vaporizare a materialului, în prezența unui gaz de lucru reactiv;

- **TL** prin descompunere termochimică a materialului.

Aceste modele analitice permit scrierea relațiilor de calcul pentru o serie de **FO**: viteza maximă de tăiere, grosimea maximă a **OP**, lățimea medie a tăieturii, grosimea stratului de material topit, iar prin particularizarea constantelor de material este posibilă trasarea dependențelor funcționale ale acestor **FO** de diferiți **FI**, pentru cazul unor materiale reprezentative pentru fiecare dintre cele trei tipuri de procedee **TL** amintite anterior.

Aspectele de mai sus constituie obiectul capitolului 3, care este original atât sub aspectul concepției cât și al cazurilor particulare tratate, oferind în același timp o imagine unitară și complet nouă asupra tuturor **FI** și **FO** ce pot să apară la **TL**.

c) modelarea experimentală a **TL** în scopul evidențierii valorilor **FI** care asigură atingerea domeniilor de optim pentru o serie de **FO** considerate de interes tehnologic primar; aceasta presupune:

- definirea **FO**, identificarea **FI** și descrierea utilajului și a condițiilor în care se efectuează experimentările;

- realizarea unor experimente preliminare în scopul evidențierii și eliminării factorilor ne semnificativi pentru proces;

- găsirea ecuațiilor de regresie corespunzătoare modelelor empirice căutate prin prelucrarea datelor rezultate în urma realizării unor programe experimentale;

- formularea concluziilor privind optimizarea **FO** definite.

Modelarea experimentală se realizează pentru două materiale considerate reprezentative pentru mecanismele de **TL** analizate în teză: polimetacrilatul de metil (**PMMA**) și oțelul carbon (**OL**).

Cele prezentate mai sus fac obiectul capitolului 4 al tezei de doctorat, capitol în întregime original, atât din punct de vedere al identificării **FI** și definirii **FO** cât și al

proiectării, realizării și prelucrării rezultatelor experimentării.

Pe baza rezultatelor obținute în cap.3 și cap.4, în cap.5 este propus un algoritm general pentru modelarea tăierii laser în scopul optimizării tehnologiei.

În finalul lucrării este introdus un capitol în care sunt formulate concluziile finale și prezentate principalele contribuții originale.

Teza de doctorat cuprinde un total de 184 pagini, 35 tabele, 126 figuri și 132 titluri bibliografice. Lista bibliografică cuprinde și 18 lucrări proprii ale autorului, dintre care 13 elaborate singur și 5 în colaborare. Teza include, de asemenea, un număr de 4 anexe care prezintă detalii privind calculele sau programarea instalației experimentale.

Autorul consideră această lucrare ca o modestă, dar utilă contribuție la optimizarea aplicării industriale a tăierii cu FL CO<sub>2</sub> cu funcționare în undă continuă (continuous wave ⇒ cw) a materialelor. El aduce și pe această cale mulțumiri în primul rând prof.dr.ing. Alexandru Nichici, conducător științific al lucrării, care l-a îndrumat și sprijinit în activitatea desfășurată și căruia îi datorează atât formarea ca cercetător științific cât și cea de cadru didactic. Mulțumiri pentru înțelegerea și ajutorul acordat în elaborarea și finalizarea tezei de doctorat sunt aduse, de asemenea, colectivului Catedrei de Tehnologie Mecanică, colectivului laboratorului de laseri CALFA-Béthune și nu în ultimul rând, familiei.

## CAPITOLUL 2

### FENOMENOLOGIA TĂIERII MATERIALELOR CU FASCICULE LASER CO<sub>2</sub> cw

#### 2.1. Caracterizarea fasciculelor laser CO<sub>2</sub> cw utilizate la tăierea materialelor

##### 2.1.1. Fasciculele laser ca agenți erozivi

Fasciculele laser emise de către surse sunt transformate în agenți erozivi prin focalizare. La puteri ale FL inferioare valorii de 2000 W, care constituie domeniul abordat în teza de doctorat, focalizarea este realizată practic exclusiv cu ajutorul lentilelor [13],[57],[106].

În urma focalizării rezultă o zonă de arie minimă (spot laser ⇒ SL) și implicit de densitate de putere maximă a FL numită în continuare zonă focală (ZF). Aria rezultată din intersecția FL focalizat cu suprafața OP va fi numită pată focală (PF), ea putând corespunde SL sau unui diametru superior acestuia, după cum focalizarea FL se face sau nu pe suprafața OP.

În prezent, dincolo de dificultățile existente, legate de măsurarea efectivă a parametrilor de interes pentru cercetător (dimensiunea SL, distribuția intensității radiației în FL reale), comunicarea rezultatelor experimentale ale laboratoarelor de cercetare nu se face într-o formă universal acceptată [105]. De altfel, până la ora actuală nu există standarde în acest sens, ceea ce face ca datele tehnologice publicate să fie de multe ori greu sau chiar imposibil de comparat. În prezent se încearcă crearea unei baze de date la nivel mondial [57],[65] privind procesarea materialelor cu laseri.

S-a ajuns astfel la concluzia că pentru a putea descrie corect și complet FL cw în vederea asigurării reproductibilității rezultatelor privind procesarea materialelor, în particular la tăiere, este necesară cunoașterea următoarelor mărimi: diametrul și

divergența **FL** în **ZF**, structura modală, calitatea, strălucirea și stabilitatea pentru o lungime de undă ( $\lambda$ ) dată, precum și caracteristicile lentilei concentratoare [122].

Teza de doctorat se ocupă doar de **TL CO<sub>2</sub> cw**, rezultând astfel implicit lungimea de undă  $\lambda=10,6\mu\text{m}$ . Pe de altă parte, literatura de specialitate [27],[60],[119] este unanim de acord că la **TL** pentru atingerea unor performanțe superioare de precizie, **FL** trebuie să aibă o structură cât mai apropiată de  $\text{TEM}_{00}$ , chiar dacă aceasta atrage după sine obținerea unor puteri mai mici la ieșirea din sursa laser; pentru performanțe superioare de productivitate, recurgerea la puteri mari și structuri multimod ale **FL** este însă obligatorie. În cele ce urmează, toate referirile (dacă nu se fac precizări suplimentare) vor fi făcute la **FL** cu distribuția gaussiană a intensității radiației, descrisă de relația (fig.2.1):

$$I(x, y, z) = I_0 \cdot \exp^{-2(x^2+y^2)/w^2(z)} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (2.1)$$

$z$  fiind direcția de propagare, iar  $w(z)$  raza convențională a **FL**.

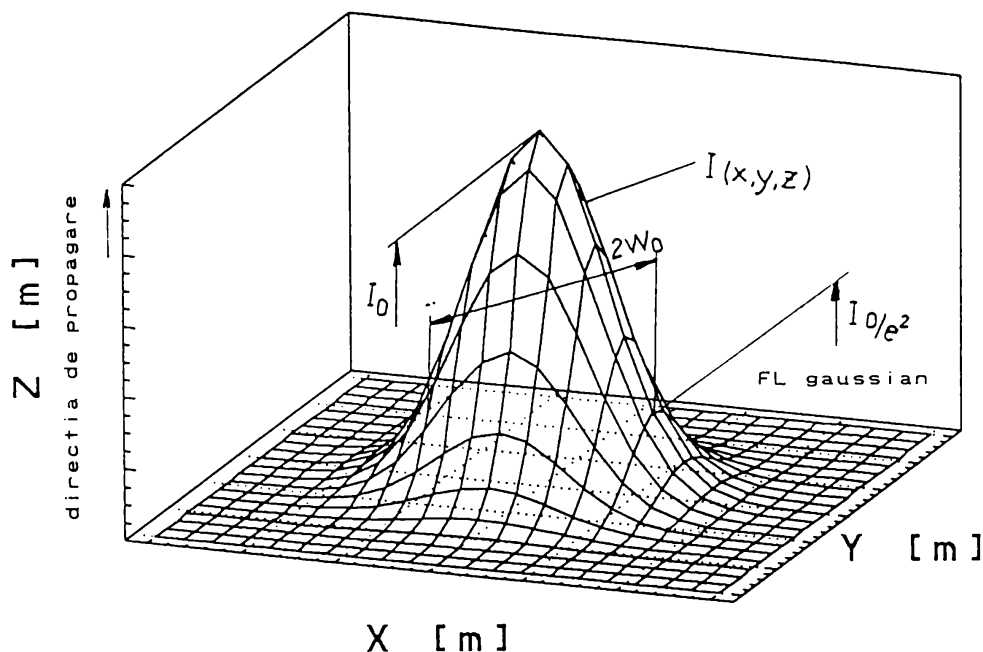


Fig.2.1

Puterea **FL** rezultă ca integrala mărimii  $I(x,y,z)$  pe secțiunea transversală a **FL**.

În contextul celor prezentate mai sus, se analizează în continuare celelalte mărimi necesare pentru caracterizarea **FL CO<sub>2</sub> cw**: diametrul, divergența, calitatea,



strălucirea si stabilitatea.

### 2.1.2. Diametrul fasciculelor laser

Deoarece teza de doctorat tratează problema TL a materialelor, s-a optat pentru următoarea definiție aplicabilă FL gaussiene: valoarea diametrului (convențional) al FL este egală cu distanța dintre punctele în care intensitatea fasciculului este egală cu  $1/e^2$  din cea maximă,  $I_0$  (fig.2.1) si care, pentru TEM<sub>00</sub> include 86% din puterea FL.

Cu titlu informativ se face precizarea că alte definiții consideră dimensiunea transversală convențională cea corespunzătoare unui procent (cel mai frecvent 86% sau 90%) din puterea FL [10],[69]. Aria suprafeței definită în acest mod, împreună cu dimensiunile ei minimă și maximă, sunt considerate a fi parametrii ce ar putea caracteriza din punct de vedere practic dimensiunile transversale ale FL simetrice sau asimetrice. Motivația acestor definiții este faptul că, dacă pentru o distribuție gaussiană sau dreptunghiulară a intensității, definiția pe baza raportului  $I_0/e^2$  dă o dimensiune satisfăcătoare a FL (fig.2.2), pentru modurile de ordin superior se observă (fig.2.3) că o parte însemnată a puterii este situată în afara diametrului convențional; în acest ultim caz, se poate accepta ca satisfăcător diametrul convențional al FL ca fiind dat de distanța dintre inflexiunile extreme ale distribuției intensității (fig.2.3).

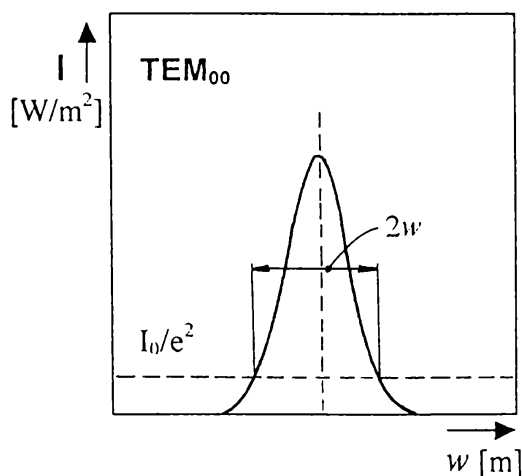


Fig. 2.2

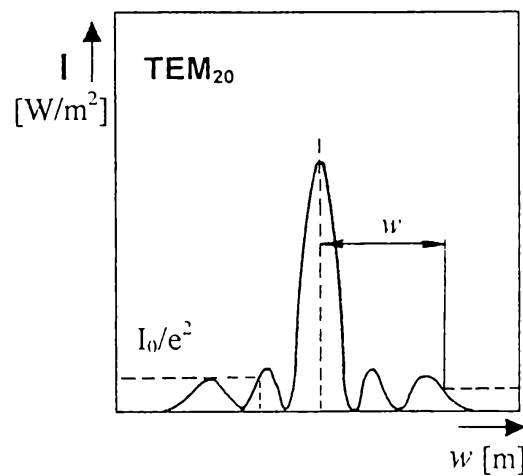


Fig. 2.3

Diametrul SL (**DS**) este limitat inferior în principal de două fenomene: difracția și aberația de sfericitate.

Pentru un FL gaussian, cu lungimea de undă a radiației  $\lambda$  și diametrul convențional  $D$  incident pe o lentilă cu distanța focală  $f$  (fig.2.4), din condiția de difracție **DS** este [64],[132]:

$$2w_{0d} = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D} \quad [\text{m}] \quad (2.2)$$

Pentru multe aplicații practice, în care distribuția de intensitate se consideră uniformă pe secțiunea FL, este valabilă relația:

$$2w_{0d} = \frac{2,44 \cdot \lambda \cdot f}{D} \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

**DS** limitat de aberația de sfericitate se poate determina cu relația:

$$2w_{0s} = k_s \cdot \frac{D^3}{f^2} \quad [\text{m}] \quad (2.4)$$

$k_s$  este un coeficient ce depinde de indicele de refracție al lentilei, de forma acesteia și de poziția ei [115].

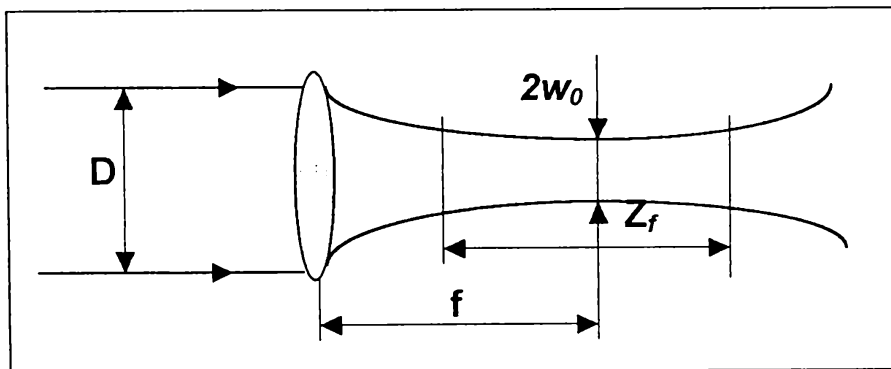


Fig. 2.4

În aceste condiții, **DS** pentru un FL ideal se poate determina cu o bună aproximație cu relația:

$$2w_0 = 2 \cdot (w_{0d} + w_{0s}) \quad [\text{m}] \quad (2.5)$$

Pe baza relațiilor (2.2), (2.4) și (2.5) au fost trasate, cu ajutorul programului MATHCAD [108], curbele din fig.2.5 ce caracterizează **DS** unui FL CO<sub>2</sub> gaussian,

focalizat cu o lentilă din CdTe ( $k_s=0,0284$ ), cu  $f=127$  mm.

Se observă (fig.2.5) că valoarea minimă (optimă) a lui DS,  $2w_{0opt}$  este de aproximativ  $85\mu m$  și corespunde unui  $D = 25$  mm.

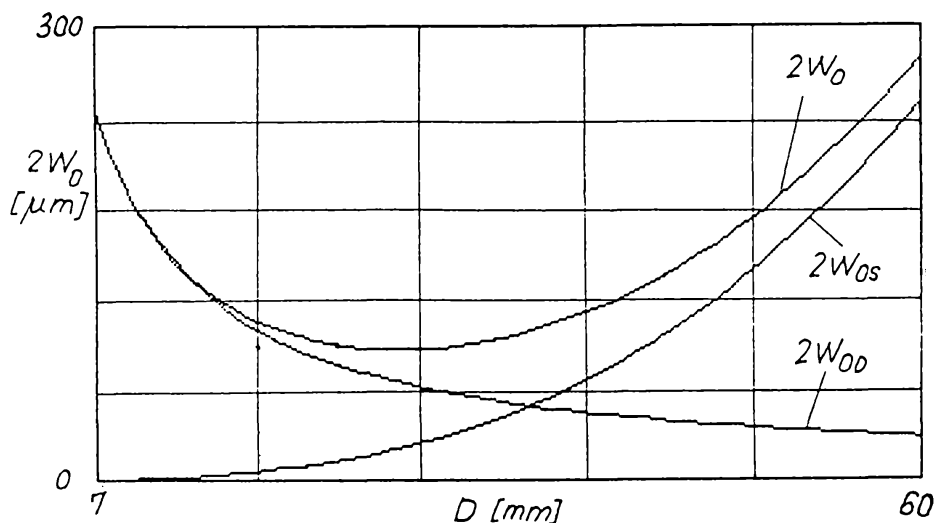


Fig.2.5

În fig.2.6 se observă comparativ variația lui  $2w_0$  în cazul focalizării unui FL  $CO_2$  gaussian, cu lentile din CdTe având  $f_1 = 127$  mm și respectiv  $f_2 = 63,5$  mm.

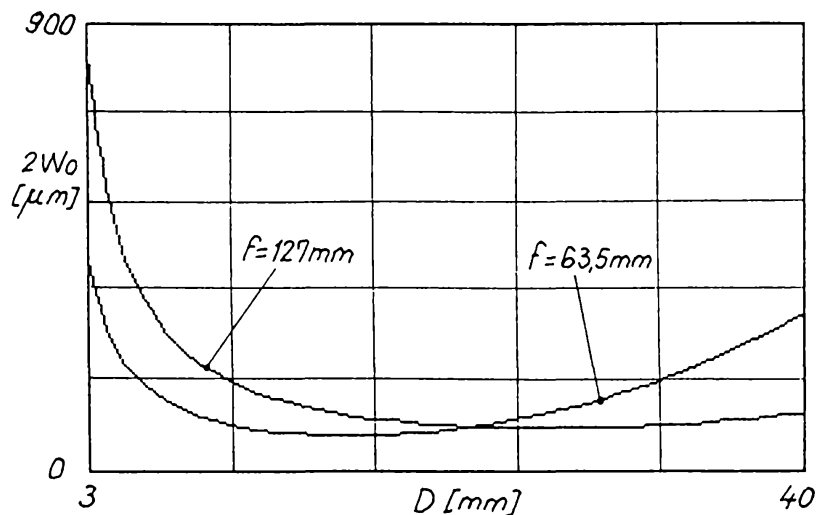


Fig.2.6

Este de remarcat faptul că, deși valoarea minimă a lui  $2w_0$  se obține pentru  $f_2$ , prin focalizare cu lentila cu  $f_1 = 127$  mm, crește intervalul de diametre  $D$  pentru care DS păstrează dimensiuni reduse.

În general, relația (2.5) poate fi utilizată pentru rezolvarea a două probleme de optimizare ce au ca FO minimizarea DS,  $2w_0$  :

a) calculul diametrului optim  $D_{opt}$  al FL incident pe o lentilă dată ( $f = \text{const.}$ )

(fig.2.7):

$$D_{opt} = \frac{(4\lambda \cdot f^3)^{1/4}}{(3\pi \cdot k_s)^{1/4}} \quad [\text{m}] \quad (2.6)$$

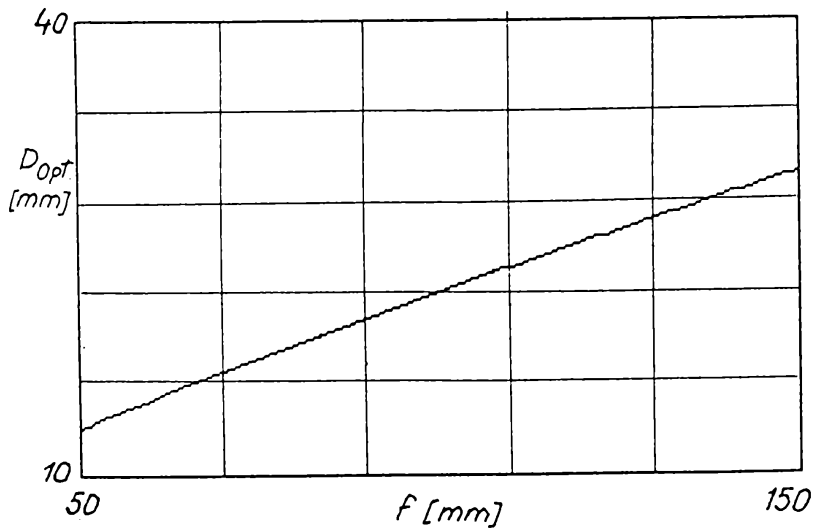


Fig.2.7

b) calculul distanței focale optime,  $f_{opt}$  a unei lentile de formă dată, pentru un FL dat ( $D = \text{const.}$ ) (fig.2.8):

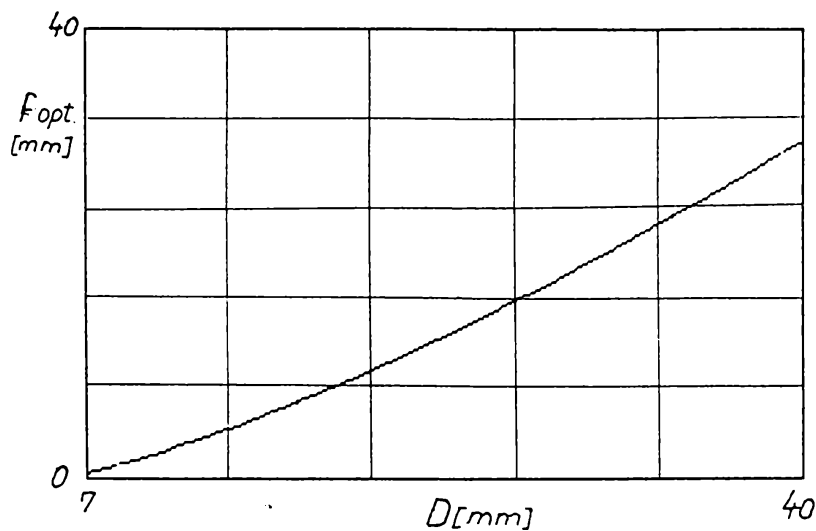


Fig.2.8

$$f_{opt} = \frac{(\pi \cdot k_s \cdot D^4)^{1/3}}{(2\lambda)^{1/3}} \quad [m] \quad (2.7)$$

Este de remarcat însă că, minimizarea **DS** prin scăderea lui  $f$ , duce simultan și la scăderea lungimii **ZF** (fig.2.9 și paragraful 2.1.3.), ceea ce determină modificarea penetrabilității **FL** [12].

### 2.1.3. Divergența fasciculelor laser

Este parametrul caracterizat prin unghiul de divergență,  $2\theta$  (fig.2.11), și care dă o măsură a creșterii diametrului **FL** în direcția de propagare (fig.2.4).

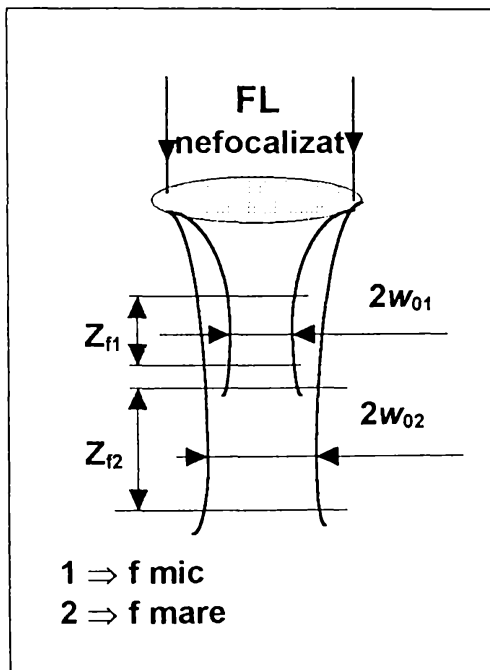


Fig.2.9

Din punctul de vedere al tăierii materialelor, este interesantă divergența **FL** rezultată în **ZF**, care dă o măsură a distanței longitudinale pe care intensitatea radiației laser obținută în **SL** se menține (fig.2.10).

Profundimea convențională a **ZF** se consideră a fi distanța de-a lungul direcției de propagare a **FL** pentru care **DS** se modifică cel mult cu 5%. Pe baza acestei definiții, rezultă lungimea **ZF** a unui **FL** gaussian (fig.2.4) [16]:

$$Z_f = \frac{8\lambda \cdot f^2}{\pi \cdot D^2} \quad [m] \quad (2.8)$$

Relațiile (2.5) și (2.8) precum și fig.2.9 sugerează următoarea concluzie practică pentru **TL**: la tăierea materialelor cu grosimi relativ ridicate se vor prefera lentile cu distanță focală mare (obișnuit  $f = 127\text{mm}$ ) pentru a asigura o penetrabilitate a **ZF** pe o porțiune cât mai mare din grosimea **OP**, în vreme ce pentru **OP** subțiri, vor fi alese

lentile cu distanță focală mică (obișnuit  $f = 63,5\text{mm}$ ) pentru a asigura intensități maxime ale FL, prin minimizarea DS.

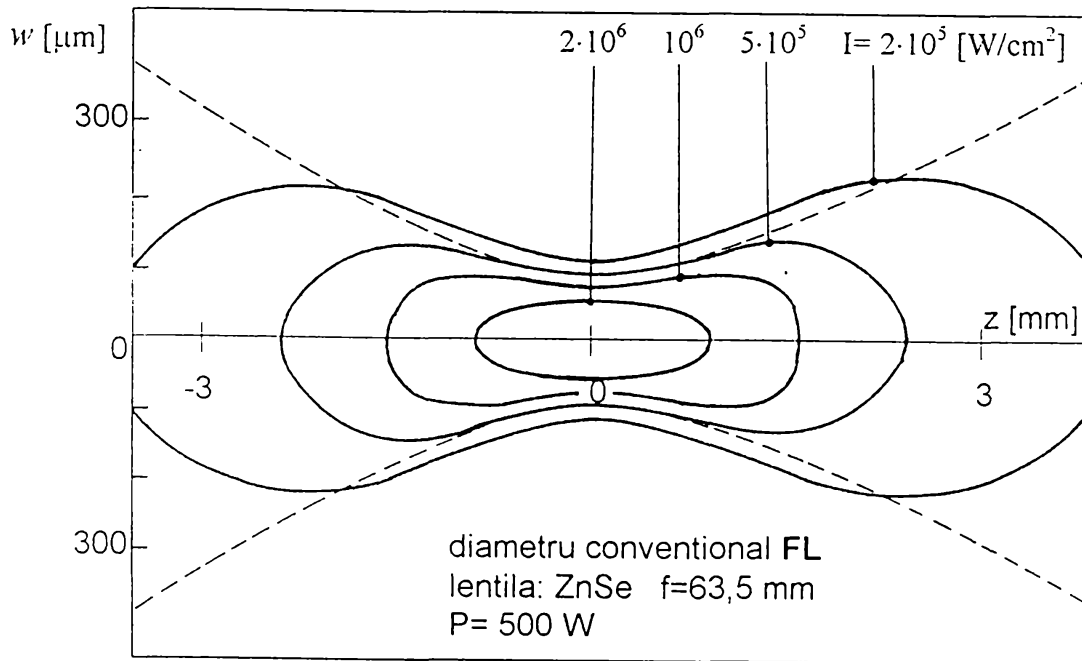


Fig.2.10

#### 2.1.4. Calitatea fasciculelor laser

Deoarece procesarea materialelor, în particular tăierea, se face cu FL reale, calitatea este un concept ce-și face tot mai mult loc pentru caracterizarea FL din punct de vedere al performanțelor tehnologice și al interschimbabilității.

Mărima:

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot w_{0R} \cdot \theta_R \quad [-] \quad (2.9)$$

în care indicele "R" înseamnă "real", se numește factor de calitate al FL și are, prin ipoteză, valoarea  $M^2 = 1$  pentru FL ideal (gaussian).

Pentru FL reale, întotdeauna  $M^2 > 1$  și aceasta deoarece în ele există o suprapunere de moduri transversale (chiar dacă numai unul este dominant), care fiecare, contribuie la forma distribuției de intensitate. În mod obișnuit, laserii utilizați

la procesarea materialelor au factorul de calitate cuprins între 1,2 și 200, iar pentru o sursă laser dată,  $M^2$  variază cu puterea de ieșire (de regulă crește cu creșterea puterii) [51].

Cu ajutorul conceptului de factor de calitate, diametrul unui FL real poate fi calculat în orice punct de-a lungul direcției sale de propagare [51],[60].

Legătura dintre diametrul și divergența FL reale și ale FL ideal este:

$$2w_R(z) = M \cdot 2w(z) \quad [\text{m}] \quad (2.10)$$

$$2\theta_R(z) = M \cdot 2\theta(z) \quad [\text{rad}] \quad (2.11)$$

Din cele de mai sus, rezultă că FL de calitate ( $M^2 \rightarrow 1$ ) prezintă următoarele avantaje interesante din punct de vedere practic (fig.2.11) [51]:

- lungime de colimare  $b_c$  ridicată;
- DS ( $2w_{0R}$ ) de dimensiuni reduse;
- lungime ridicată a ZF;
- unghi de divergență ( $2\theta_R$ ) scăzut.

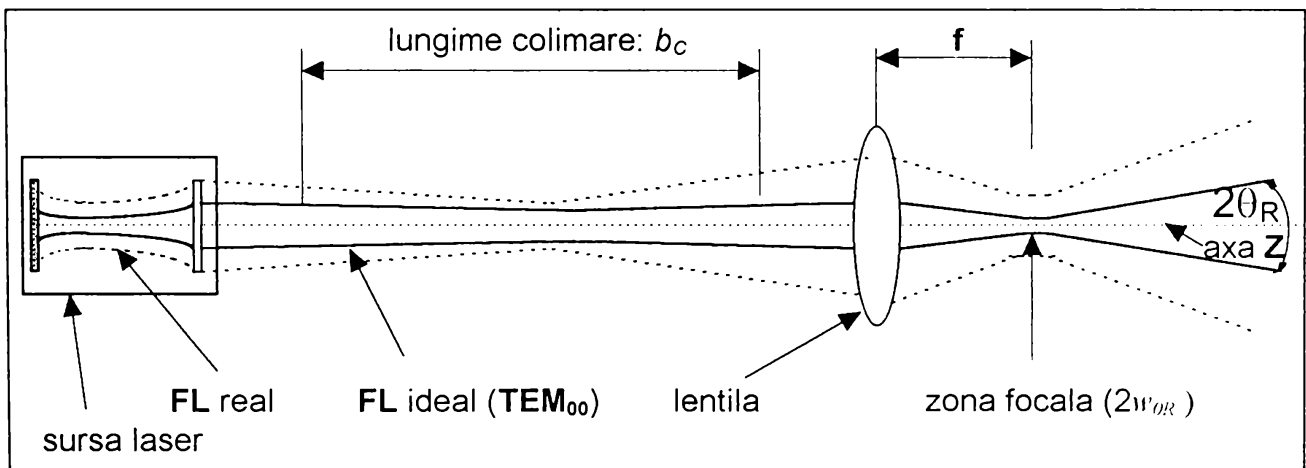


Fig.2.11

Pentru FL reale, relațiile de optimizare (2.6) și respectiv (2.7) se scriu:

$$D_{optR} = D_{opt} \cdot (M^2)^{1/4} \quad [\text{m}] \quad (2.12)$$

$$f_{optR} = f_{opt} \cdot \frac{1}{(M^2)^{1/3}} \quad [\text{m}] \quad (2.13)$$

Faptul că practic majoritatea parametrilor de interes ai **FL** reale pot fi exprimați cu ajutorul lui  $M^2$  a condus la ideea ca ISO să elaboreze un standard de calitate a **FL**, având la bază exclusiv factorul  $M^2$ . Există însă și păreri [65] conform cărora numai factorul de calitate nu este suficient pentru definirea globală a calității **FL** și că o clasificare rigidă, numai după acest parametru, poate da erori de apreciere.

Deși la ora actuală problema standardizării calității **FL** este încă în studiu, rămâne de necontestat faptul că mărimea  $M^2$  este deosebit de utilă în aprecierea parametrilor și în compararea performanțelor **FL** reale, utilizate la procesarea materialelor, fapt pentru care tot mai mulți producători de surse laser îl iau în considerare.

#### 2.1.5. Strălucirea fasciculelor laser

Dintre proprietățile care individualizează **FL** față de celelalte surse de lumină, strălucirea este proprietatea cea mai importantă pentru procesarea materialelor. Ea poate fi determinată cu relația:

$$S = P_L \cdot (\lambda \cdot M^2)^{-2} \quad [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{sterad}] \quad (2.14)$$

$P_L$  reprezentând puterea **FL**.

Din (2.14) rezultă ca strălucirea maximă corespunde unui **FL** ideal ( $M^2 = 1$ ) și că în absența pierderilor de putere de-a lungul traiectoriei de propagare a **FL**,  $S$  este constantă.

O aplicație practică deosebit de utilă a conceptului de strălucire, este posibilitatea determinării intensității **FL** în **ZF**, având unghiul de divergență  $2\theta_R$  (fig.2.11) ca parametru:

$$I_{ZF} = \frac{\pi}{4} \cdot (2\theta_R)^2 \cdot S \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (2.15)$$

Relația (2.15) permite compararea facilă și rapidă a **FL** din punct de vedere al performanțelor.

În plus, pentru cazul particular al tăierii, se pot face următoarele observații:

- relația de legătură dintre viteza maximă de tăiere și strălucirea **FL** nu este liniară [51] și depinde de condițiile concrete ale aplicației;
- creșterea strălucirii determină creșterea vitezei maxime de tăiere la ceilalți



parametri constanți, în special ca urmare a creșterii intensității **FL** în **ZF**;

- dimensiunile **SL** trebuie corelate cu grosimea **OP** și viteza relativă **FL-OP**, în caz contrar putându-se ajunge la lățimi ale tăieturii atât de reduse încât evacuarea produselor erodate să fie imposibilă [16];

Conceptele de factor de calitate și strălucire stau la baza comparării între diferitele surse laser, dar trebuie menționat faptul că interschimbabilitatea totală (chiar pentru două **FL** cu aceleași  $M^2$  și  $S$ ) se realizează numai în condițiile în care sistemul optic de focalizare este astfel calculat încât să determine aceeași geometrie a **ZF**.

#### 2.1.6. Stabilitatea fasciculelor laser

Performanțele și repetabilitatea lor în cazul **TL** depind într-o măsură însemnată de stabilitatea în timp a **FL**. Este de remarcat, de exemplu faptul că la o putere a **FL**  $P_L = 1\text{kW}$ , o variație a distanței focale  $f$  a lentilei cu 1% (ca rezultat al modificării indicelui de refracție datorită încălzirii excesive, ca efect al murdăririi), poate produce măriri semnificative ale **DS**, afectând sensibil calitatea procesării, [91].

Dacă, în general, la grosimi ale **OP** de peste 3 mm, stabilitatea valorilor instantanee ale diferiților parametri este un factor de importanță secundară privind calitatea tăieturilor și, în particular, rugozitatea pereților, la tăierea de precizie a materialelor subțiri, situația se schimbă radical, modificări de ordinul 1...5% cu perioade de variație de 0,05...0,1ms ale acestor mărimi pot conduce la alterări majore ale calității tăieturilor [58],[67].

Cercetări efectuate asupra unor parametri de interes practic, cum ar fi: puterea de ieșire, diametrul **FL**, poziția centrului fasciculului, poziția centrului distribuției de energie, poziția maximului intensității și valoarea acestuia arată că instabilitatea lor crește cu creșterea puterii și depinde de construcția sursei laser [67].

Controlul instabilității, în sensul minimizării ei, presupune acțiunea asupra a două categorii de factori:

- factori intrinseci sursei, mai puțin accesibili utilizatorului, cum sunt (pentru laserii  $\text{CO}_2$ ): presiunea și mișcarea mediului activ, descărcarea electrică de pompaj, forma plasmii, răcirea etc.;

- factori extrinseci sursei: gradul de curățenie al componentelor optice, gradul de filtrare al mediului înconjurător, vibrațiile mecanice etc., factori asupra cărora utilizatorul poate de regulă să acționeze.

## 2.2. Absorbția de către materiale a radiației laser CO<sub>2</sub> cw

Pentru inducerea de efecte utile din punct de vedere tehnologic privind procesarea materialelor, energia FL caracterizat de parametrii definiți mai sus, trebuie să fie absorbită cel puțin parțial de materialul OP.

Parametrul care descrie cantitativ absorbția FL poartă numele de absorbțivitate,  $A$  și se definește ca raportul dintre intensitatea radiației laser absorbită de OP,  $I_A$ , și cea incidentă,  $I$ , la un anumit moment, într-un anumit loc pe suprafața OP:

$$A(x, y, z, t) = \frac{I_A(x, y, z, t)}{I(x, y, z, t)} \quad [-] \quad (2.16)$$

Corespunzător, se definește reflectivitatea,  $R$ :

$$R = 1 - A \quad [-] \quad (2.17)$$

Absorbția radiației laser de către solide depinde de o multitudine de FI, între care cei mai importanți care aparțin FL sunt [6],[28],[61]:

- lungimea de undă;
- incidența (în cazul incidenței oblice, polarizarea);
- intensitatea, fluența;
- modul de operare;
- structura modală;

iar între cei care aparțin OP:

- natura materialului (proprietățile optice, fizico-chimice etc.);
- temperatura;
- rugozitatea;
- gradul de impurificare al suprafeței absorbante.

Această multitudine de FI (între care unii sunt greu contolabili) generează

dificultăți serioase în determinarea exactă a absorbivității materialului și deci, în comportarea acestuia la interacțiunea cu FL. De exemplu, în cazul metalelor, informațiile disponibile în literatură privind absorbivitatea măsurată la incidența cu radiații laser de diferite lungimi de undă, și în particular pentru  $\lambda = 10,6\mu\text{m}$  sunt insuficiente și adesea contradictorii (vezi  $A_{\text{măs}}$  din tab.2.1) [120].

**Valori ale absorbivității la temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$**

Tabela 2.1

Metalul	$A_D \cdot 10^{-3}$	$A_{\text{măs}} \cdot 10^{-3}$	Metalul	$A_D \cdot 10^{-3}$	$A_{\text{măs}} \cdot 10^{-3}$
Ag	3,9	4,7	Au	5,9	6,0
		5,0			6,1
		7,7			8,1
Al	10,6	12,4	Cu	4,9	6,5
		13,0			7,5
		18,2			11,4

Situația menționată mai sus se datorează dificultăților legate de identificarea și estimarea corectă a fiecărui termen din relația de calcul a absorbivității unui OP metalic, ce se acceptă că poate fi determinată cu relația:

$$A = A_{INT} + A_{EXT} = A_D + A_A + A_{IB} + A_R + A_{ID} \quad [-] \quad (2.18)$$

în care:

- $A_{INT} \Rightarrow$  absorbivitatea intrinsecă  $A_{INT} = A_D + A_A + A_{IB}$ ;
- $A_{EXT} \Rightarrow$  absorbivitatea extrinsecă  $A_{EXT} = A_R + A_{ID}$ ;
- $A_D \Rightarrow$  termenul datorat formalismului Drude;
- $A_A \Rightarrow$  termenul datorat efectului pelicular anomal;
- $A_{IB} \Rightarrow$  termenul datorat tranzițiilor interbandă energetică;
- $A_R \Rightarrow$  termenul datorat rugozității;
- $A_{ID} \Rightarrow$  termenul datorat impurităților și defectelor de suprafață.

Formalismul Drude se bazează pe ipoteza că metalul conține electroni liberi supuși acțiunii câmpului electric al radiației incidente într-un mediu vâscos caracterizat printr-un parametru fenomenologic de atenuare,  $\tau$ , a cărui valoare este determinată de ciocnirile electronilor cu impuritățile, imperfecțiunile (defectele) și rețeaua cristalină [120].

Pe baza formalismului Drude se poate determina adâncimea de atenuare a radiației laser în metale (numită și grosime a stratului pelicular),  $a_D$  și care este o măsură directă a gradului de penetrație a radiației în material:

$$a_D = \frac{c}{2\omega_p} \quad [\text{m}] \quad (2.19)$$

în care:

- $c \Rightarrow$  viteza luminii în vid,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s;
- $\omega_p \Rightarrow$  frecvența plasmei; ~~pentru laserii CO<sub>2</sub>,  $\omega_p = 1,78 \cdot 10^{14}$  rad/s.~~

În tab.2.2 [120] sunt date câteva valori ale parametrilor  $\tau$  și  $\omega_p$  la  $T = 20^\circ\text{C}$ . Considerând valorile din tab.2.2, rezultă adâncimea de atenuare  $a_D$  de ordinul de mărime  $10^{-8}$  m, ceea ce arată caracterul de suprafață al sursei termice generate prin absorbția radiației laser CO<sub>2</sub> de către metale.

**Valori ale parametrilor  $\omega_p$  și  $\tau$  la temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$**

Tabela 2.2

Metalul	$\omega_p \cdot 10^{16}$ [rad/s]	$\tau \cdot 10^{-14}$ [s]	Metalul	$\omega_p \cdot 10^{16}$ [rad/s]	$\tau \cdot 10^{-14}$ [s]
Ag	1,43	3,49	Cu	1,17	1,25
Al	2,23	0,80	Pb	1,12	0,32
Au	1,32	2,47	W	0,87	1,29

Deoarece în cazul particular al radiației laser cu  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ , respectiv al suprafețelor metalice care urmează a fi procesate (nelustruite), termenii  $A_{I1}$ , respectiv  $A_{IB}$  sunt neglijabili în comparație cu  $A_D$ , absorbțivitatea intrinsecă a metalelor se poate determina cu relația:

$$A_{INT} \cong A_D \quad [-] \quad (2.20)$$

În tab.2.1 se observă o bună concordanță între  $A_D$  și valorile minime măsurate ale absorbțivității,  $A_{m\grave{a}s}$ . Obținerea unor valori  $A_{m\grave{a}s}$  superioare se datorează imposibilității practice de a elimina influența termenilor componentei  $A_{EXT}$ . În măsura în care această componentă se reduce, valorile măsurate respectă relația (2.20).

În cazul materialelor nemetalice, în principă datorită neomogenității, anizotropiei

si complexității structurii lor, determinarea componentei  $A_{INT}$  a absorbivității este extrem de dificilă pe cale teoretică [95], teoriile existente nefurnizând în general rezultate suficient de apropiate de cele experimentale, motiv pentru care se preferă ca pentru aceste materiale absorbivitatea să se determine prin măsurări.

Pentru tehnologi, în vederea unor aprecieri rapide, se poate estima, într-o primă aproximație că  $A_{INT}$  este proporțională cu rezistivitatea electrică,  $\rho_E$ . În aceste condiții, situația particulară a materialelor nemetalice, în comparație cu metalele este clar relevată de datele din tab.2.3 [85].

**Valori ale rezistivității electrice  $\rho_E$ ,  
a unor materiale de interes industrial**

Tabela 2.3

Materialul	$\rho_E \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega/m$ ]	Materialul	$\rho_E \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega/m$ ]	Materialul	$\rho_E \cdot 10^{-4}$ [ $\Omega/m$ ]
Polietilenă	$10^{25}$	Cauciuc	$10^{17}$	Uraniu	30
PMMA	$2 \cdot 10^{22}$	Grafit	$1,3 \cdot 10^3$	Aur	2...3
Sticlă	$10^{21}$	Titan	150	Cupru	1...2
Ceramică	$10^{21}$	Oțel	80	Argint	1...6

Absorbivitatea intrinsecă nu este o mărime constantă, ea depinzând în principal de:

- a) temperatura **OP**;
- b) lungimea de undă a radiației;
- c) polarizarea radiației.

a) Absorbivitatea materialelor (în particular metalice) crește cu temperatura, chiar de câteva ori la creșterea temperaturii de la temperatura ambiantă la temperatura de vaporizare (fig.2.12) [129].

b) Absorbivitatea majorității materialelor (în particular metalice) prezintă o tendință generală de creștere odată cu scăderea lungimii de undă a radiației laser incidente, din infraroșu spre ultraviolet (fig. 2.12 si fig. 2.13). În particular, reflectivitatea tuturor metalelor pentru  $\lambda = 10,6\mu m$  este ridicată. Sunt recomandate din acest motiv radiații cu  $\lambda < 4\mu m$  pentru prelucrarea metalelor si cu  $\lambda > 4\mu m$  pentru prelucrarea materialelor nemetalice [19],[85]. Uneori, la prelucrarea cu FL CO<sub>2</sub> a

materialelor metalice, pentru asigurarea unui cuplaj corespunzător **FL-OP**, se practică acoperirea suprafeței **OP** cu un strat subțire (în general de oxid) puternic absorbant.

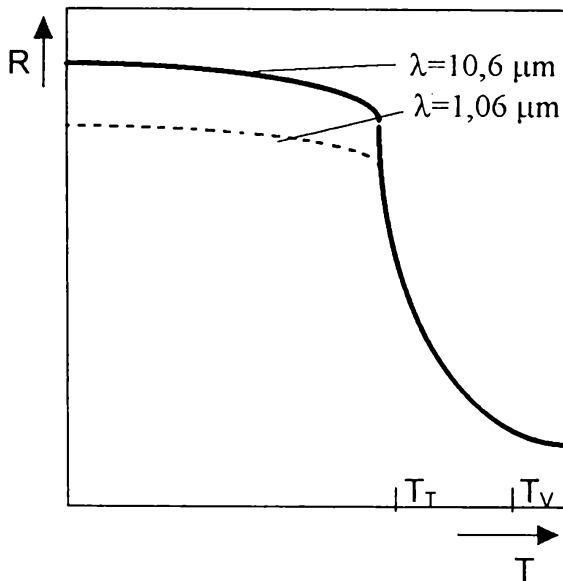


Fig.2.12

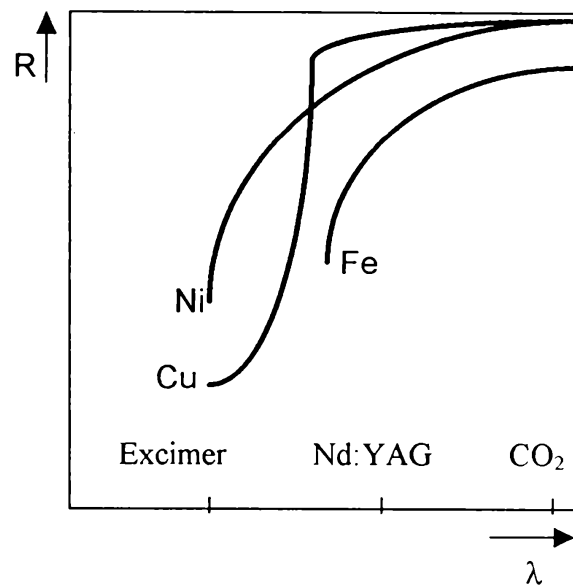


Fig.2.13

c) La incidență normală, absorbția radiației este independentă de polarizare. În cazul unei incidențe oblice sub unghiul  $\gamma < 90^\circ$  între direcția **FL** și suprafața **OP**, se pot calcula, funcție de absorbțivitatea  $A$  la incidență normală, componentele  $A_{||}(\gamma)$ , respectiv  $A_{\perp}(\gamma)$  pentru radiația polarizată liniar paralel, respectiv perpendicular față de planul de incidență:

$$A_{||}(\gamma) = \frac{A}{\cos \gamma} \quad [-] \quad (2.21)$$

$$A_{\perp}(\gamma) = A \cdot \cos \gamma \quad [-] \quad (2.22)$$

În particular, datorită faptului că **FE** la **TL** este înclinat față de direcția de propagare a **FL** (vezi paragraful 2.4), absorbțivitatea **OP** în această zonă depinde pe de o parte de polarizarea **FL** și pe de altă parte de unghiul de înclinare  $\gamma$  al **FE**. În fig. 2.14 a și fig.2.14 b [93] sunt reprezentate curbele de dependență ale absorbțivității pentru modurile  $TEM_{00}$  respectiv  $TEM_{01}$  funcție de  $\gamma$  pentru diferite polarizări ale unui **FL**  $CO_2$  cw și poziții relative ale **SL** în raport cu suprafața unui **OP** din **OL** cu grosimea  $s = 3\text{mm}$ . Din cele două figuri rezultă că:

- absorbțivitatea **OP** pentru  $TEM_{00}$  este întotdeauna superioară absorbțivității pentru modulul  $TEM_{01}$ ; deci **FL** gaussiene sunt optime pentru **TL**;

- fiecare curbă prezintă o valoare extremală a absorbivității, corespunzătoare unui unghi  $\gamma = \gamma_{\max}$ .

Din motive deja prezentate precum și datorită faptului că radiația laser polarizată liniar duce la modificarea lățimii și calității tăieturilor în cazul schimbării direcției de tăiere [36],[132], din punctul de vedere al tezei de doctorat, sunt interesante doar curbele referitoare la FL TEM<sub>00</sub> polarizate circular.

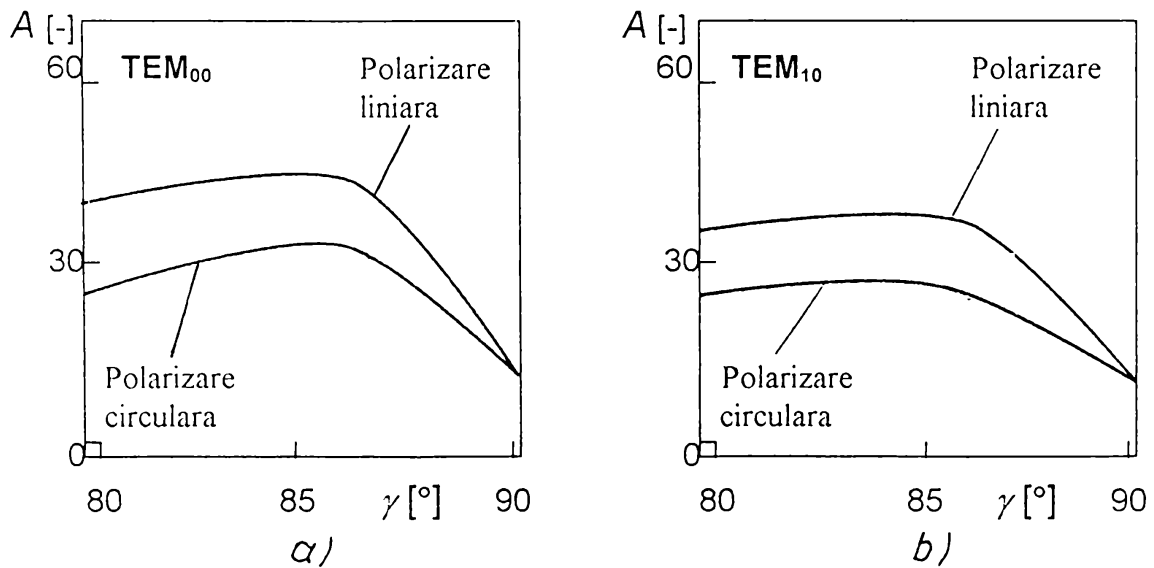


Fig.2.14

Deoarece la unghiuri  $\gamma < \gamma_{\max}$ , FE nu se află complet sub incidența radiației laser, rezultă că TL devine un proces nestaționar [93]. Din acest motiv, zona optimă de operare este pentru  $\gamma \in [\gamma_{\max}, 90^\circ]$ , urmărindu-se în paralel obținerea unei absorbivități cât mai ridicate.

Marile diferențe apărute între valorile măsurate ale absorbivității în condiții date (vezi tab.2.1) sunt puse în legătură cu gradele de finisare și de curățenie ale OP reale supuse acțiunii FL. În relația (2.18) aceste aspecte sunt luate în considerare prin termenul  $A_{EXT} = A_R + A_{ID}$ .

Influența rugozității asupra absorbivității materialelor este complexă deoarece:

- rugozitatea este la originea unei suprafețe absorbante cu arie mărită;
- sunt oferite radiației zone de incidență oblică;
- se creează zone închise, în care radiația este captată și absorbită integral.

În general, se poate face afirmația calitativă că prin creșterea rugozității rezultă creșterea absorbivității [86],[120].

Pe de altă parte, influența defectelor și impurităților asupra absorbivității suprafețelor metalice este mare, termenul  $A_{ID}$  fiind de regulă cu unul sau chiar două ordine de mărime mai mare decât  $A_{INT}$ . În particular, în vreme ce  $A_{INT}$  la metale nu depășește câteva sutimi (pentru  $\lambda = 10,6\mu\text{m}$ ), în cazul oxizilor metalici, poate atinge unitatea.

În concluzie, se poate afirma că absorbivitatea materialelor este o mărime extrem de complexă, în general dificil de estimat teoretic și cu variații mari de la o condiție particulară la alta. Acesta este unul dintre motivele pentru care, din punct de vedere practic o modelare analitică prea pretențioasă a TL nu este nici eficientă, nici justificată și, în anumite situații, nici posibilă.

Literatura de specialitate [7],[45] recomandă în cazul iradierii cu FL CO<sub>2</sub> pentru calcule estimative de primă aproximație:  $A = 0,8...0,9$  pentru materiale polimerice (în particular PMMA), respectiv  $A = 0,2...0,3$  pentru OL, în ipoteza că suprafața lor nu a fost depusă și păstrată în așa fel încât să fie reflectătoare. Valorile au la bază ideea că o suprafață ce urmează să fie tăiată cu FL este suficient de rugoasă și cu impurități superficiale care demarează procesul de încălzire, după care, după cum s-a văzut mai sus, însuși materialul OP devine suficient de absorbant.

## 2.3. Încălzirea materialelor ca urmare a absorbției radiației laser

### 2.3.1 Ecuția conducției termice

În urma absorbției energiei FL de către materialul OP, intensitatea fasciculului incident scade exponențial cu grosimea, după legea:

$$I(z) = I_A \cdot \exp(-\alpha_A \cdot z) \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (2.23)$$

în care:  $\alpha_A$  [ $\text{m}^{-1}$ ] se numește coeficient de absorbție.

Valoarea lui  $\alpha_A$  este foarte mare în cazul metalelor, ducând la adâncimi de pătrundere a radiației,  $a_D$  submicronice (vezi rel.2.19), în vreme ce pentru majoritatea



materialelor nemetalice,  $\alpha_A$  este cu câteva ordine de mărime mai mic.

Datorită faptului că energia absorbită pe suprafața iradiată a **OP** este transformată practic integral în căldură, putem deosebi pentru  $\lambda=10,6\mu\text{m}$ :

- materiale opace (în particular, metalele), la care  $a_D$  este de ordinul a  $10^{-2}\mu\text{m}$ , încălzirea având un caracter de suprafață;

- materiale parțial transparente, la care atenuarea intensității radiației se produce mult mai lent, încălzirea dobândind un caracter volumic;

- materiale transparente ( $\alpha_A$  are valori foarte mici), utilizate pentru fabricarea de elemente optice (lentile, ferestre, etc.); în particular, pentru **FL CO<sub>2</sub>**, astfel de materiale sunt: NaCl, Ge, CdTe, ZnSe, GaAs etc.

Primele două categorii de materiale pot constitui **OP** cu **FL**.

La ora actuală, practic toate materialele de interes industrial care se taie cu **FL** necesită intensități ale fasciculului incident mai mici de  $10^8$ - $10^9$  W/cm<sup>2</sup> și timpi de interacțiune **FL-OP** mai mari de  $10^{-9}$  s (fig.2.15),[73],[85],[116], situații în care nu se ating condițiile pentru care ecuația clasică a căldurii să-și piardă valabilitatea, astfel încât noțiunea de temperatură rămâne un concept valid. În aceste condiții, cele trei mecanisme care fac posibil transferul de căldură sunt: conducția, convecția și radiația.

La **TL**, **OP** este solid și, în consecință, efectele sunt legate în primul rând de conducție; mai mult, chiar la schimbările de fază, în cazul apariției unei pelicule lichide, datorită timpului relativ scurt de încălzire, grosimii relativ mici a stratului topit și, în general, dimensiunilor mici ale **FE**, transferul căldurii prin convecție nu este semnificativ și poate fi neglijat [9]. Pierderile radiative încep să fie semnificative abia în cazul plasmelor suficient de fierbinți, situație care nu apare în domeniul abordat de teza de doctorat. Jetul de gaz de lucru insuflat coaxial cu **FL** este luat în considerare numai din punct de vedere al efectului de agent de evacuare al produselor erodate (în cazul gazelor neutre sau chimic inerte), respectiv și printr-un efect de sursă termică suplimentară (paragrafele 3.3.2 și 3.4.) în cazul gazelor chimic active.

Ca urmare, rezultă că transferul fluxului termic de la suprafața **OP** poate fi studiat teoretic, cu o bună aproximație, exclusiv pe baza transferului de căldură prin conducție [11],[19],[71],[74],[92],[116],[121].

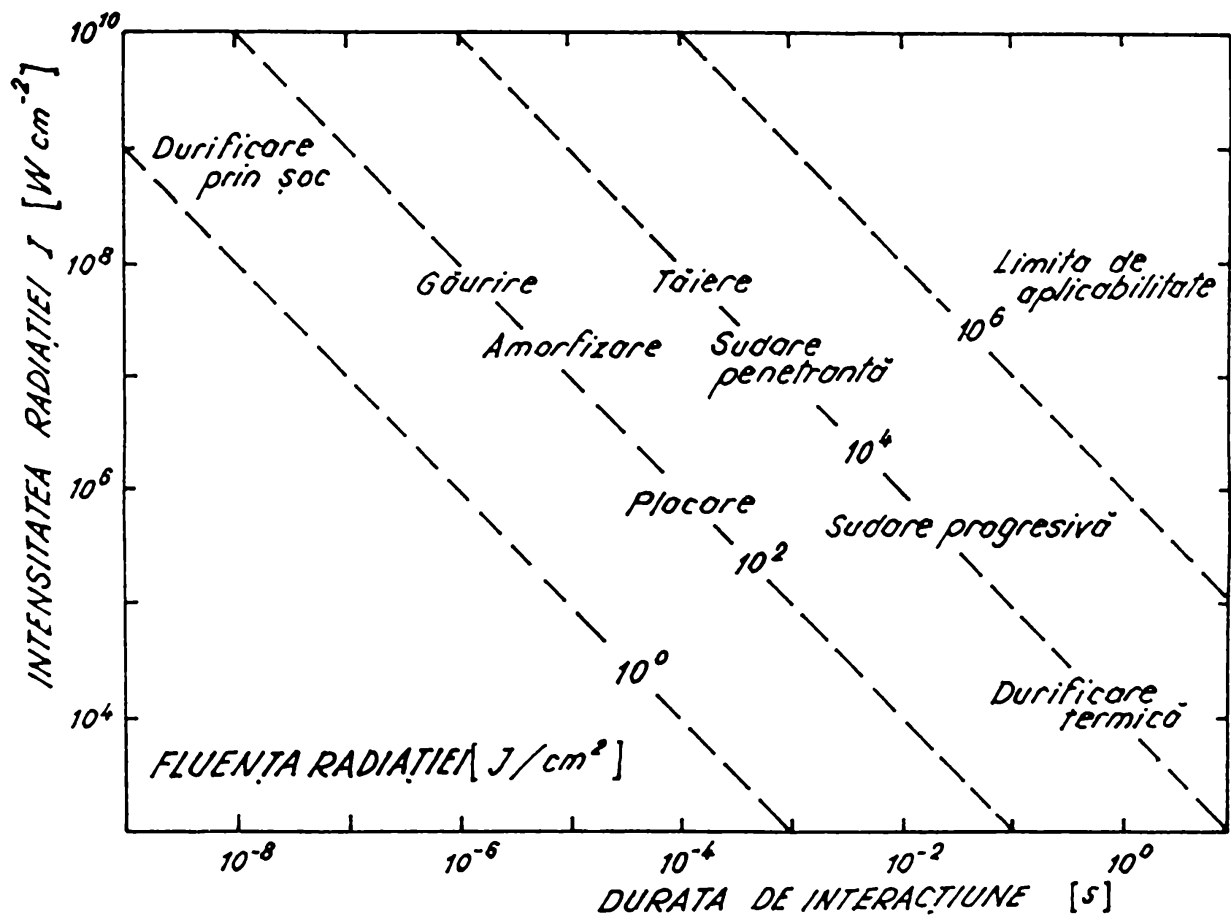


Fig.2.15

Forma și valorile câmpului de temperatură,  $T(x,y,z,t)$ , care în final determină efectele tehnologice, se pot determina în acest caz cu ajutorul ecuației căldurii (Fourier):

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) + I_V(x,y,z,t) + \rho \cdot C \cdot v \cdot \left[ \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad [\text{W/m}^3] \quad (2.24)$$

în care:

$I_V(x,y,z,t)$  [W/m<sup>3</sup>] ⇒ funcția de distribuție a sursei termice în volumul OP ;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] ⇒ densitatea materialului OP;

$K$  [W/m·K] ⇒ conductivitatea termică a materialului OP;

$C$  [J/kg·K] ⇒ capacitatea calorică a materialului OP;

$v$  [m/s] ⇒ viteza relativă FL-OP.

Între mărimile  $\rho$ ,  $K$  și  $C$  există legătura cunoscută:

$$\kappa = \frac{K}{C \cdot \rho} \quad [\text{m}^2 / \text{s}] \quad (2.25)$$

în care cu  $\kappa$  s-a notat difuzivitatea termică a materialului **OP**.

Cu titlu informativ, în tab.2.4 și tab.2.5 [45],[120],[121] sunt date valori ale mărimilor  $K$ ,  $C$ ,  $\rho$ ,  $\kappa$  pentru diferite temperaturi, alături de valorile altor mărimi utile în aprecierea efectelor termice:

$T_T$  [K]  $\Rightarrow$  temperatura de topire a materialului **OP**;

$T_V$  [K]  $\Rightarrow$  temperatura de vaporizare a materialului **OP**;

$\lambda_T$  [J/kg]  $\Rightarrow$  căldura latentă de topire a materialului **OP**;

$\lambda_V$  [J/kg]  $\Rightarrow$  căldura latentă de vaporizare a materialului **OP**,

pentru diferite materiale de interes industrial.

**Valori orientative ale  $K, C, \rho, \kappa$  la  $T = 20^\circ\text{C}$**

Tabela 2.4

Materialul	$\rho \cdot 10^{-3}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C \cdot 10^{-3}$ [J/kg·K]	$K$ [W/m·K]	$\kappa \cdot 10^{-4}$ [m <sup>2</sup> /s]
Aluminiu	2,70	0,90	210	0,86
Argint	10,50	0,24	410	1,70
Aur	19,30	0,13	300	1,18
Cupru	8,30	0,39	380	1,14
Fier	7,80	0,47	60	0,18
Wolfram	19,30	0,13	150	0,60
Oțel carbon	7,85	0,46	39	0,11
Oțel inox	8,00	0,48	13	0,034
Polietilenă	0,90	1,30	0,25	0,0022
PMMA	1,19	1,42	0,2	0,0008

**Valori ale  $T_T, T_V, \lambda_T, \lambda_V$**

Tabela 2.5

Materialul	$T_T$ [K]	$T_V$ [K]	$\lambda_T \cdot 10^{-3}$ [J/kg]	$\lambda_V \cdot 10^{-3}$ [J/kg]
Aluminiu	933	2740	406,6	10512
Cupru	1356	2868	209,7	4790
Aur	1336	3080	64,2	1864
Argint	1234	2485	113,4	2324
Fier	1806	3023	278,2	6242
Nichel	1726	3003	303,9	6441

Ecuția căldurii scrisă în forma generală (2.24) poate fi utilizată pentru calculul distribuției de temperatură în **OP** pentru oricare dintre următoarele situații practice:

- **FL** fără mișcare relativă față de **OP** ( $v = 0$ );
- **FL** acționând în regim pulsant (pw) asupra **OP** ( $I_V = 0$  pe suprafața **OP** în pauza dintre pulsuri);
- **FL** cu mișcare relativă cu viteza  $v$  în raport cu **OP** și acționând în regim cw (situație abordată în teza de doctorat).

Teoretic vorbind, rezolvarea ecuației (2.24) pentru o funcție de distribuție a sursei termice  $I_V(x, y, z, t)$  dată, în condiții particulare ( $C, K, \rho$ ) date și în condiții inițiale cunoscute, furnizează valoarea temperaturii  $T$  în orice moment  $t > 0$  și în orice punct  $(x, y, z)$  al **OP**; se poate face observația că  $I_V(x, y, z, t)$  împreună cu condițiile la limită determină forma (familia) soluției ecuației (2.24), în vreme ce amplitudinea soluției (efectul produs) este determinat de valorile parametrilor  $C, K, \rho$ , adică de natura materialului **OP**.

Deoarece în general, mărimile  $C, K, \rho$  sunt dependente de temperatură, rezolvarea exactă a ecuației (2.24) nu este posibilă. Pentru cazurile când aceste dependențe de temperatură se cunosc sau se presupun, este posibilă cel puțin teoretic, o rezolvare numerică a ecuației căldurii. Dificultatea rezolvării ecuației Fourier este amplificată de luarea în considerare a dependenței de temperatură a funcției de distribuție a sursei termice în volumul **OP**,  $I_V(x, y, z, t)$ , care depinde, pe de o parte, de forma spațială și temporală a intensității **FL** ([45] și paragraful 2.1) și, pe de altă parte, de absorbivitatea  $A$  a materialului (paragraful 2.2).

Din aceste motive, elaborarea de modele analitice în vederea optimizării tehnologiei de **TL** pornind de la rezolvarea unor sisteme de ecuații de acest tip (fiecare fază necesită scrierea unei ecuații de tipul 2.24), este nepractică și uneori chiar imposibilă, ținând cont de timpul de calcul necesar, de mărimea memoriei de calculator ce trebuie alocată și de diversitatea (atât din punct de vedere al formei și dimensiunilor, cât și a naturii **OP**) problemelor ce trebuie să fie abordate.

De aceea, soluția mai rațională, pentru care s-a optat și în teza de doctorat, pare a fi elaborarea unor modele analitice relativ simple, bazate pe scrierea unei soluții particulare ale ecuației conducției termice (2.24), ținând seama de condițiile

particulare prin care este generat **FE** la **TL** CO<sub>2</sub> cw, modele care să permită alegerea (cel puțin orientativă) a parametrilor de iradiere, pornind de la care optimizarea se poate realiza în continuare experimental (cap.3 și cap.4).

Pentru obținerea modelelor analitice căutate, este necesară, în prealabil, găsirea ecuațiilor analitice fundamentale ale acestora, respectiv:

- a) scrierea soluției particulare adecvate pentru ecuația conducției termice;
- b) precizarea mecanismului fizic prin care este generat **FE** precum și a bilanțurilor energetic și masic care îl guvernează.

### 2.3.2. Soluții particulare ale ecuației conducției termice

Numeroși autori [14],[15],[32],[53],[66],[100],[117] s-au ocupat de găsirea soluțiilor ecuației conducției termice pentru diferite cazuri particulare ce țin seama de: distribuția spațială și temporală a sursei termice,  $I_V$ , de raportul dintre diametrul acesteia și grosimea **OP**, respectiv adâncimea de difuzie, cazuri întâlnite la procesarea materialelor cu laseri.

Definind mărimile [31]:

$$z_D = \sqrt{\frac{\kappa \cdot t}{K_T}} \quad [\text{m}] \quad (2.26)$$

numită adâncime de difuzie termică și care reprezintă din punct de vedere fizic adâncimea până la care temperatura scade de “e” ori față de cea de la suprafața **OP**, (fig.2.16a), respectiv:

$$C_T = K_T \cdot \frac{z^2}{\kappa} \quad [\text{s}] \quad (2.27)$$

numită constantă termică de timp și care reprezintă din punct de vedere fizic timpul de interacțiune **FL-OP** necesar pentru ca adâncimea de penetrare a radiației să fie egală cu  $z$  (fig.2.16b), în general, mulțimea problemelor particulare întâlnite la procesarea materialelor cu **FL**, se situează între două cazuri limită:

- a) corp subțire din punct de vedere termic ( $s \ll z_D$ );
- b) corp gros din punct de vedere termic ( $s \gg z_D$ ),

în aprecieri ținându-se seama și de raportul între diametrul **FL**,  $2\nu_R$  și grosimea **OP**,

s. Funcție de problema particulară tratată, constanta  $K_T$  poate avea valori diferite (de obicei  $4/\pi$  sau  $1/4$ ).

Literatura de specialitate [31],[66],[120], tratează în detaliu cazurile particulare generate pentru diferite rapoarte între  $2w_R$ ,  $s$  și  $z_D$ . Interesantă din punct de vedere al considerațiilor ulterioare, este aproximația solidului semiinfinite care presupune relația:

$$s \gg 2w_R \gg z_D \quad [m] \quad (2.28)$$

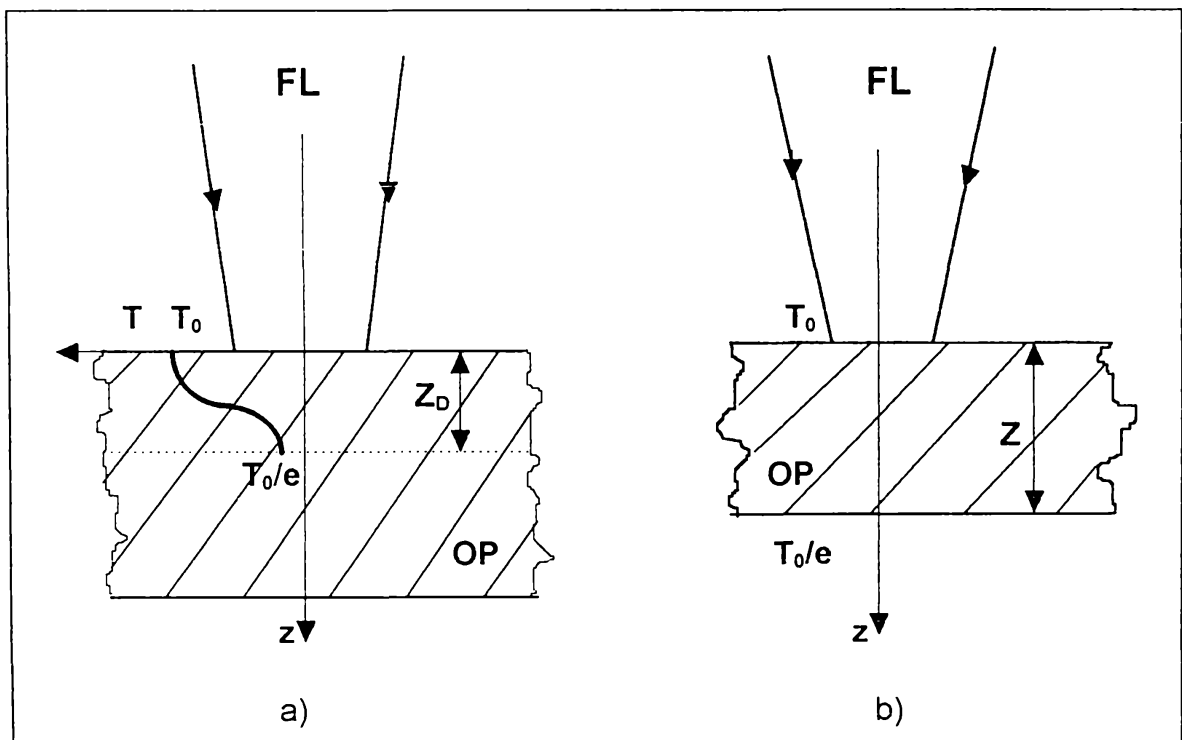


Fig.2.16

Aplicabilitatea acestei aproximații este determinată atât de proprietățile termofizice ale materialului OP, cât și de timpul de interacțiune FL-OP, același OP putând fi termic subțire pentru un anumit timp de interacțiune, dar încetând să se comporte la fel pentru timpi de interacțiune FL-OP mult mai mici.

În tab.2.6 și 2.7 sunt date informativ valori ale constantei termice de timp și adâncimii de difuzie pentru o serie de cazuri particulare.

Din punct de vedere al TL, un interes aparte prezintă următoarele situații, care au constituit puncte de plecare pentru obținerea de modele analitice [20],[23],[34],[45]:

a) **OP** semiinfinit, iradiat de un **FL** cu distribuția intensității  $I$  constantă în timp și spațiu, absorbit într-un strat superficial (fig.2.17a);

**Valori ale constantei termice de timp,  $C_T$ , pentru  $K_T=1/4$**

Tabela 2.6

Metalul	$C_T \cdot 10^{-3}$ [s] pentru <b>OP</b> având grosimile $s$ [mm]		
	$s = 0,125$	$s=0,6$	$s=2,5$
Aluminiu	0,047	1,17	18,8
Cupru	0,035	0,88	14,1
Aur	0,340	0,85	13,5
Oțel carbon	0,333	8,30	133,0
Oțel inox	1,000	25,00	401,7
Titan	0,590	14,80	237,0

**Valori ale adâncimii de difuzie termică,  $z_D$ , pentru  $K_T = 1/4$**

Tabela 2.7

Metalul	$z_D \cdot 10^{-6}$ [m] pentru $t \cdot 10^{-6}$ [s]		Metalul	$z_D \cdot 10^{-6}$ [m] pentru $t \cdot 10^{-6}$ [s]	
	$t=1$	$t=100$		$t=1$	$t=100$
Aluminiu	45,8	458	Fier	23,7	237
Cupru	49,3	493	Nichel	20,1	201
Aur	50,0	500	Titan	14,0	140

b) **OP** semiinfinit, iradiat de un **FL** cu distribuția intensității  $I$ , constantă în timp și spațiu, absorbit volumic după legea (2.23) (fig.2.17b);

c) **OP** semiinfinit, iradiat de un **FL** cu distribuția intensității  $I$ , constantă în timp și spațiu, focalizat pe suprafața **OP**, absorbit într-un strat superficial și având **SL**:  $2w_{OR} \gg z_D$  (fig.2.17c);

d) **OP** semiinfinit, iradiat de un **FL** cu distribuția intensității constantă în timp, dar gaussiană în spațiu, focalizat pe suprafața **OP**, absorbit într-un strat superficial și având **SL**:  $2w_{OR} \gg z_D$  (fig.2.17d).

Soluțiile ecuației conducției termice pentru aceste cazuri, precum și modalitățile de efectuare a calculelor pentru explicitarea acestor soluții sunt date în literatura de specialitate [17],[19],[45],[116].

Situațiile de mai sus permit determinarea distribuției de temperatură în condițiile precizate, care corespund însă etapei (nestaționare) de inițiere a **TL**, din momentul

cuplării **FL-OP** și până la străpungerea completă de către **FE** a **OP**. Ele se întâlnesc totuși în cazul unor modele analitice ale **TL** [17],[48],[54],[71],[107].

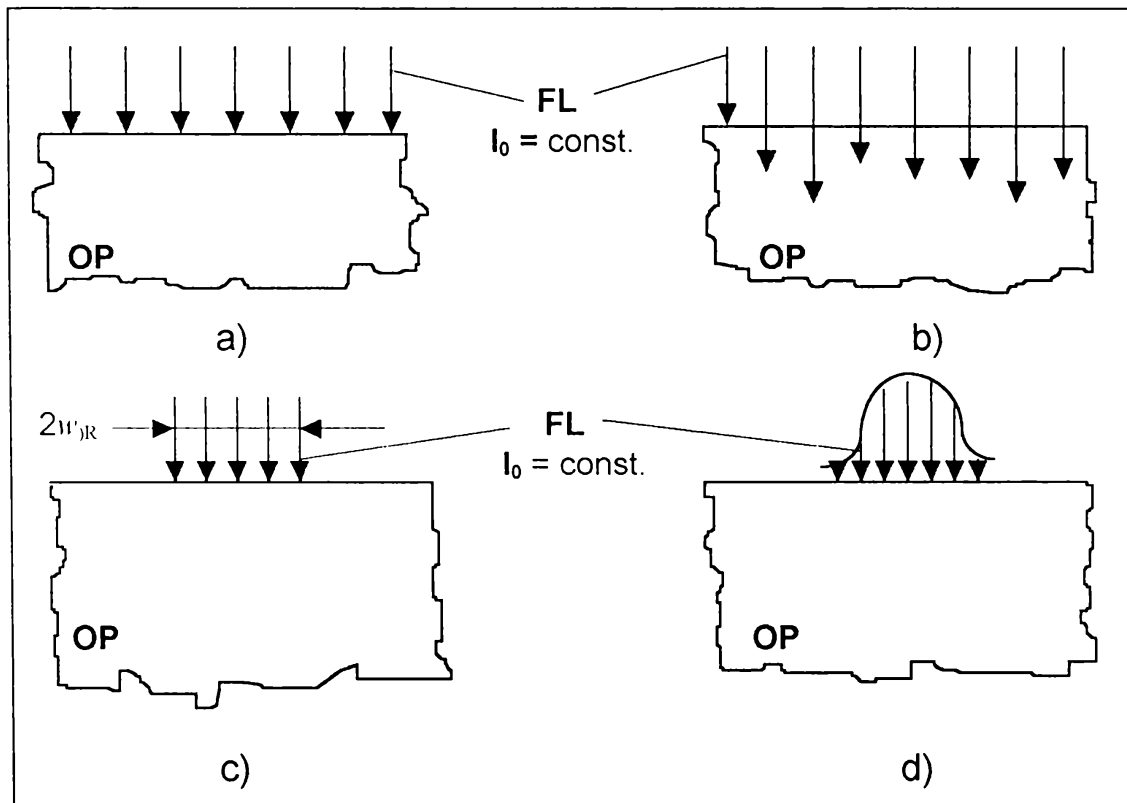


Fig. 2.17

Pentru scrierea soluției ecuației conducției termice, în teza de doctorat se pleacă de la următoarele ipoteze [1],[26],[109],[110],[111]:

- procesul de **TL** odată inițiat, poate fi considerat ca staționar, deci independent de timp;

- încălzirea materialului **OP** și formarea **FE** se fac după o direcție cvasi-perpendiculară pe suprafața **OP**, ca rezultat al interacțiunii dintre **OP** și o sursă termică (**FL**) liniară (eventual cilindrică, de diametru  $2w_0$ ) ce generează un flux termic bidimensional (după  $x$  și  $y$ ) (fig.2.18);

- viteza relativă **FL-OP** este  $v$  [m/s];

- materialul **OP** este omogen și izotrop, caracterizat de valori constante ale parametrilor  $A, C, K, \rho, \kappa$  și având temperatura inițială  $T_0$  [K];

- energia **FL** absorbită în unitatea de timp este constantă, poartă numele de putere absorbită și se notează  $P_A$  [W];



- **OP** este o placă infinită de grosime  $s$  [m]

În aceste ipoteze, soluția ecuației căldurii (2.24), se scrie [49],[120]:

$$T = T_0 + \frac{P_A}{2\pi \cdot K \cdot s} \cdot \exp\left(\frac{-v \cdot x}{2K}\right) \cdot K_0\left(\frac{v \cdot r}{2K}\right) \quad [\text{K}] \quad (2.29)$$

în care:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad [\text{m}] \quad (2.30)$$

și

$K_0 \Rightarrow$  funcția Bessel de speța a doua și ordinul zero.

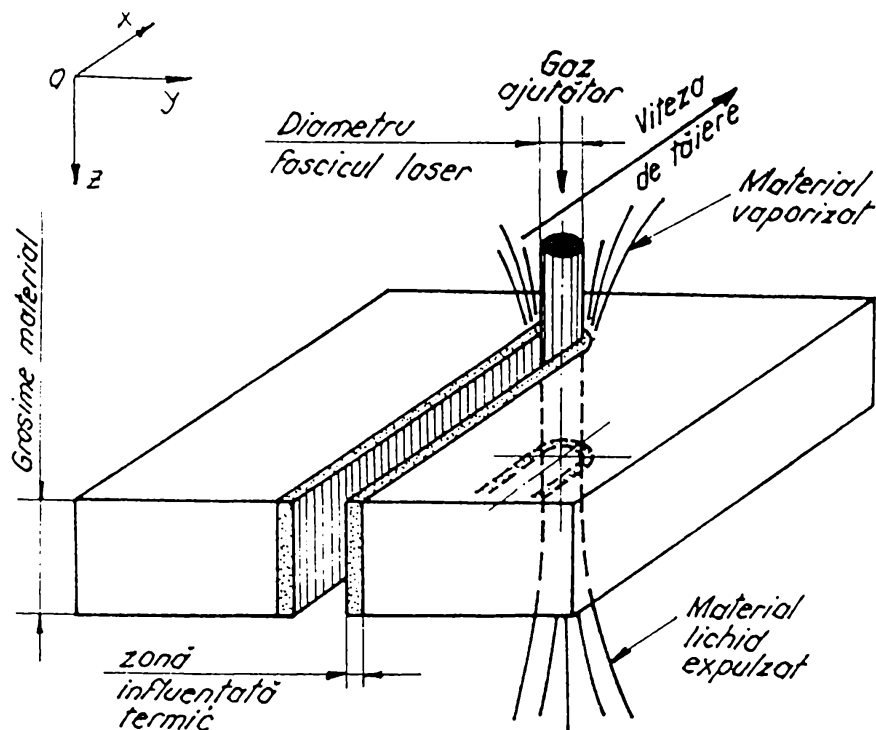


Fig.2.18

Relația (2.29) este una dintre ecuațiile fundamentale care vor fi folosite pentru explicitarea modelelor analitice ale TL prezentate în teza de doctorat și ea va fi utilizată de la caz la caz pentru precizarea formei câmpului de temperatură în OP sau pentru evaluarea pierderilor prin conducție termică. Pe baza mecanismului de formare a FE, prezentat în continuare, vor putea fi scrise celelalte ecuații fundamentale ale modelelor analitice ale TL a materialelor.

## 2.4 Formarea frontului de eroziune la tăierea materialelor cu laseri

### 2.4.1. Localizarea procedeelor de tăiere laser analizate

Pentru formularea ipotezelor și scrierea ecuațiilor fundamentale (pe lângă ecuația (2.29)) ce stau la baza elaborării modelelor analitice ale TL în diferitele variante abordate de teza de doctorat, este necesară înțelegerea proceselor fizico-chimice prin care are loc eroziunea materialului OP în respectivele situații particulare.

O imagine sintetică, cuprinzătoare a mulțimii procedeelor de TL a materialelor, grupate după criteriile fenomenologice, este prezentată în tab. 2.8 [79].

**Clasificarea procedeelor de tăiere laser**

Tabela 2.8

1. CU ÎNDEPĂRTAREA INTEGRALĂ A MATERIALULUI ÎN LUNGUL SUPRAFETEI DE SEPARARE
1.1. prin vaporizare
1.2. prin topire și vaporizare limitată
1.2.1. cu expulzarea autonomă a materialului din zona de tăiere
1.2.2. cu expulzarea materialului din zona de tăiere prin acțiunea erozivă a unui jet de gaz insuflat coaxial cu fasciculul laser
1.2.2.1. jet de gaz reactiv ( $O_2$ )
1.2.2.2. jet de gaz neutru ( $N_2$ ) sau inert (Ar)
2. CU ÎNDEPĂRTAREA PARȚIALĂ A MATERIALULUI ÎN LUNGUL SUPRAFETEI DE SEPARARE
2.1. prin vaporizarea materialului pe o adâncime adecvată realizării unui efect de crestare impus și separare ulterioară iradierii laser sub acțiunea unei solici-tări mecanice
2.2. prin vaporizarea stratului de material depus pe un suport din material de na-tură diferită
3. FĂRĂ ÎNDEPĂRTARE DE MATERIAL ÎN LUNGUL SUPRAFETEI DE SEPARARE
3.1. prin rupere controlată în stare solidă a materialului sub acțiunea și pe parcur-sul iradierii laser
3.2. prin rupere controlată în stare solidă a materialului sub acțiunea unei solici-tări mecanice, aplicată ulterior iradierii laser

Obiectul tezei de doctorat îl constituie, după cum s-a precizat și în capitolul 1, studiul celor mai răspândite procedee industriale de TL  $CO_2$  cw, care sunt cele bazate pe îndepărtarea integrală a materialului în lungul suprafeței de separare prin topire

sau descompunere termică si vaporizare limitată, asistată de un jet de gaz insuflat coaxial cu **FL** (fig.2.18) si anume:

- **TL** prin topire si vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru;
- **TL** prin oxidare, topire si vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv;
- **TL** prin descompunere termochimică.

Rezultatul direct al **TL** a **OP** este tăietura (care este definită de pereții tăieturii si de zona de material adiacentă acestora, **ZIT**), caracterizată de o serie de **FO** referitoare la calitatea acesteia sub diferite aspecte [43],[62],[79],[127]:

- fizico-chimice:
  - grosime **ZIT**;
  - proprietăți **ZIT**;
- geometrice:
  - lățime;
  - precizie dimensională, de formă si de poziție;
  - de suprafață (rugozitate).

Modelele analitice prezentate în teza de doctorat se referă la **FO** legate de calitatea geometrică a tăieturii.

Pentru toate cazurile de **TL** abordate în teza de doctorat prin **FE** se înțelege suprafața **OP** care este supusă acțiunii nemijlocite a **FL** si jetului de gaz de lucru si de pe care se îndepărtează, într-o formă sau alta, substanță.

#### 2.4.2. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin topire si vaporizare limitată,cu suflarea unui gaz de lucru neutru

Această **TL** este specifică materialelor la care reacțiile de oxidare sunt neglijabile sub aspectul energiei eliberate în proces, dar la care faza lichidă joacă un rol important în definirea calităților geometrice ale tăieturii. Exemple tipice de astfel de materiale sunt metalele inoxidabile sau cele tăiate în absența oxigenului [8],[21],[56].

Pentru această categorie de materiale s-a ajuns în prezent la consens asupra faptului că eroziunea laser este de origine termică, desfășurându-se prin succesiunea si uneori interferența următoarelor fenomene [30],[35],[42],[94],[97],[112]:

- încălzirea si topirea metalului, eventul vaporizarea limitată a acestuia;

- evacuarea de material în fază lichidă și de vapori;
- încălzirea și ionizarea vaporilor, rezultând plasma termică.

Amploarea procesului de eroziune depinde de intensitatea medie și/sau maximă a FL incident pe suprafața OP, precum și de durata interacțiunii FL-OP. Calitativ, scenariul procesului de eroziune în metale sub acțiunea FL pentru durate de interacțiune FL-OP mai mari de  $10^{-6}$  s, se desfășoară astfel (fig.2.19) [85],[101]:

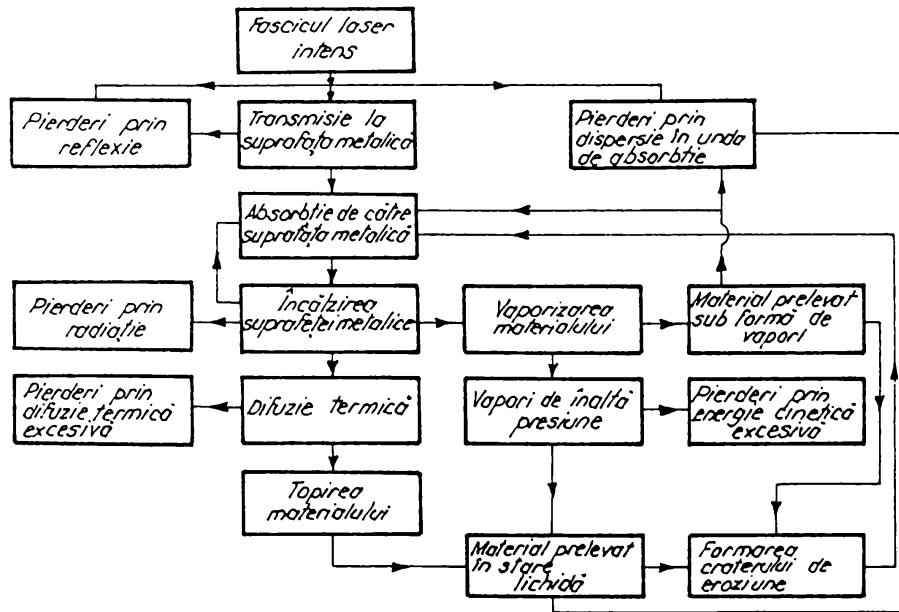


Fig.2.19

a) absorbția FL de către suprafața OP și încălzirea acestuia au loc în conformitate cu cele prezentate în paragrafele 2.2 și 2.3;

b) pentru intensități ale FL de ordinul  $I_0 = 10^5 \dots 10^6$  W/cm<sup>2</sup>, o undă termică se propagă în OP, rezultând încălzirea acestuia; de pe suprafața OP se emit electroni și ioni, însă cantitatea de substanță evacuată este nesemnificativă;

c) la creșterea intensității FL incident peste o valoare de prag,  $I_1$ , caracteristică metalului, are loc o redistribuire în balanța energetică a procesului de interacțiune FL-OP: conducția termică nu mai reușește să evacueze către interiorul OP căldura acumulată, ajungându-se astfel la topirea și chiar vaporizarea materialului; pentru majoritatea metalelor aceasta se întâmplă practic la valori ale intensității FL,  $I_0 = 10^6 \dots 10^8$  W/cm<sup>2</sup>;

d) la intensități ale **FL** de peste  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>, cheltuielile energetice pentru încălzirea, topirea și vaporizarea metalului devin neglijabile față de cele pentru ionizarea vaporilor și încălzirea plasmei create.

**TL** se realizează în condițiile descrise la punctul c), prezentând următoarele elemente particulare [62],[78],[90],[126],[127]:

- zona de interacțiune **FL-OP** este de formă cilindrică, de diametru  $2w_{OR}$  (fig.2.18 și fig.2.20), fiind definită de mărimile prezentate în paragraful 2.1;

- câmpul termic în **OP** este descris de ecuația (2.29);

- coaxial cu **FL** este insuflat un jet de gaz neutru, având ca rol principal evacuarea materialului topit (fig.2.20);

- suprafața **OP** în zona de interacțiune cu **FL** este acoperită de un strat subțire de material topit, îndepărtat continuu, pe de o parte de jetul de gaz de lucru și pe de altă parte de presiunea vaporilor de material (fig.2.20);

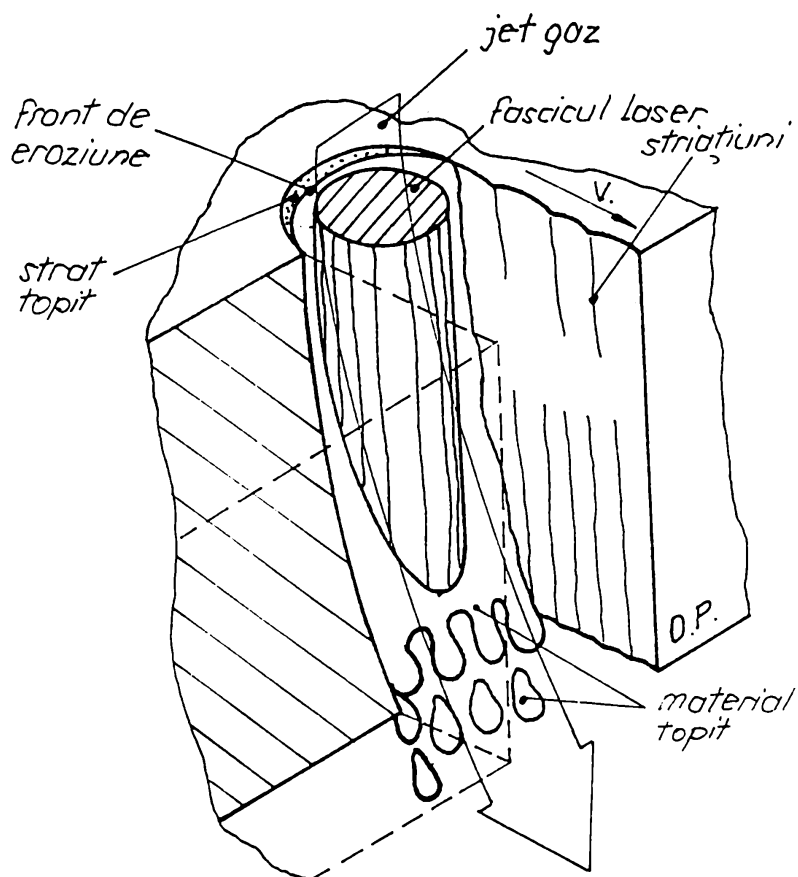


Fig.2.20

- stratul de metal lichid este delimitat de două suprafețe mobile cu viteza  $v_L$  (numită viteză a stratului lichid) în raport cu **OP**; suprafața de separație între metalul lichid și cel solid este numită front de topire (**FT**), iar suprafața liberă a metalului lichid, front de eroziune (**FE**) (fig.2.20);

- datorită formei particulare a sursei termice, **FT** și **FE**, au o formă semi-cilindrică, profilul lor într-o secțiune paralelă cu suprafața **OP**, respectiv perpendiculară pe aceasta fiind reprezentată în fig.2.21a și respectiv 2.21b; cu notațiile din figura 2.21, rezultă:

$$v_L = v \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta \quad [\text{m / s}] \quad (2.31)$$

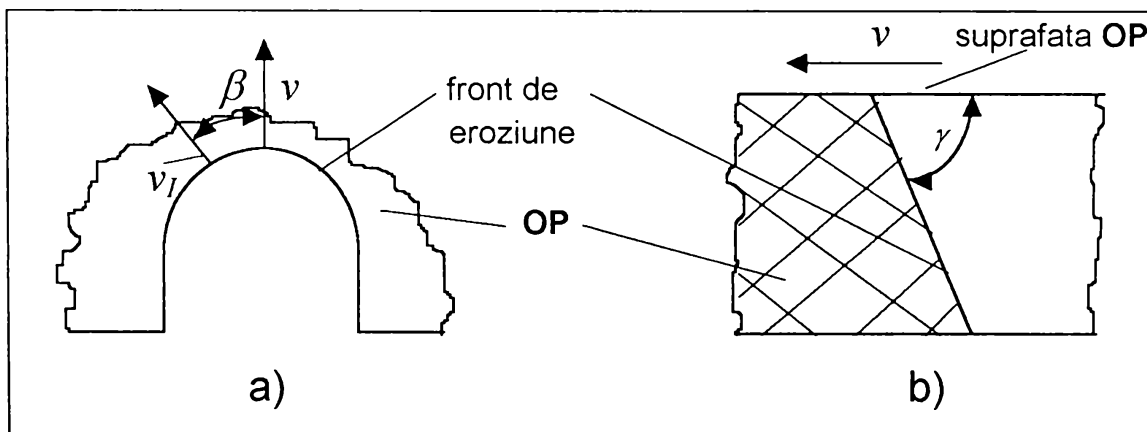


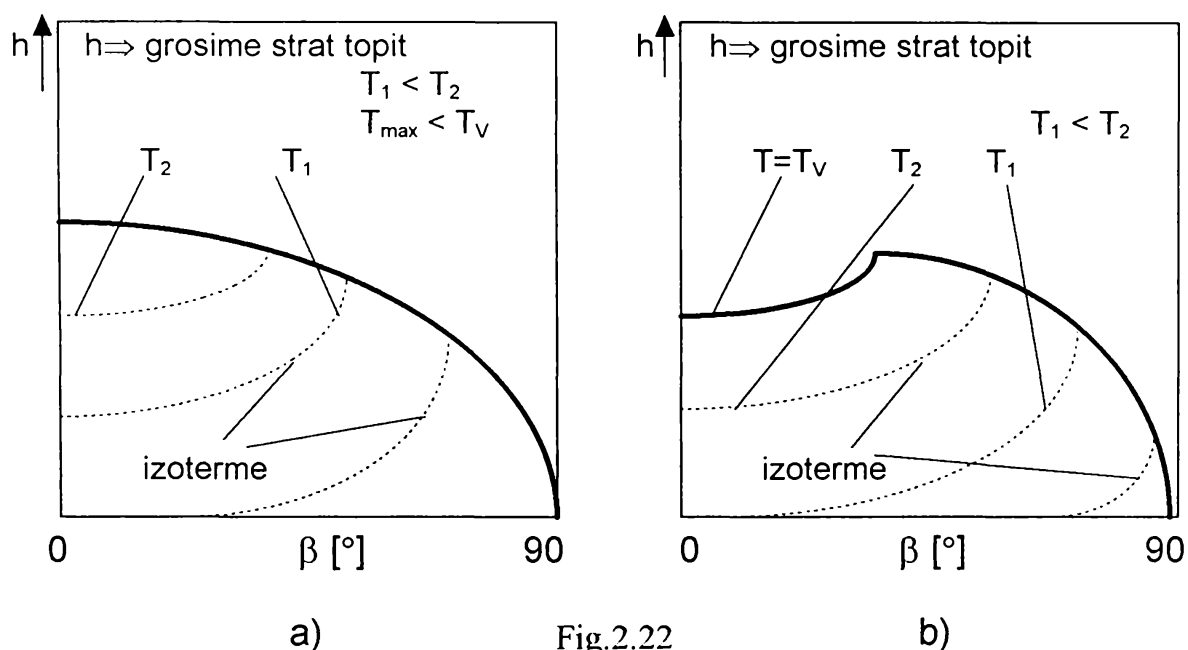
Fig.2.21

- gradientul termic are valori diferite de-a lungul **FE**, fiind proporțional cu viteza  $v_L$ ; în aceste condiții, până la apariția vaporizării rezultă o grosime a stratului topit ce variază funcție de unghiul  $\beta$  de maniera reprezentată în fig. 2.22a; se poate face observația că la unghiuri  $\beta$  mari ( $\beta \cong 90^\circ$ ), care corespund pereților tăieturii, energia primită de **OP** este relativ mică față de cea de la unghiuri  $\beta$  mici, ceea ce face ca această zonă să fie mult mai sensibilă la orice modificare în bilanțul energetic, modificare resimțită în modificarea grosimii stratului topit;

- vaporizarea începe la unghiuri  $\beta$  mici, rezultând o presiune suplimentară asupra stratului de metal topit din această zonă, ceea ce duce la modificarea grosimii lui în forma arătată în fig.2.22b; dacă vaporizarea este intensă, deplasarea metalului

lichid are loc nu numai în adâncime ci și în plan orizontal, pe pereții tăieturii, această ipoteză fiind susținută de faptul că la creșterea vitezei de tăiere (corespunzătoare unei vaporizări mai intense), unghiul de înclinare al FE,  $\gamma$ , crește (fig.2.23) arătând o mișcare bidimensională (orizontală și verticală) a metalului topit;

- structurile periodice de pe pereții tăieturii (striațiunile) sunt generate cel mai probabil de grosimea variabilă periodic a stratului topit, ca urmare a fluctuațiilor apărute în timpul TL în intensitatea FL, a vibrațiilor mecanice (vezi 2.1.6), dar, mai ales a parametrilor gazului ajutător și a frecării acestuia de metalul topit; cea mai



sensibilă reducere a mărimii striatiunilor se realizează prin reducerea grosimii stratului de metal topit.

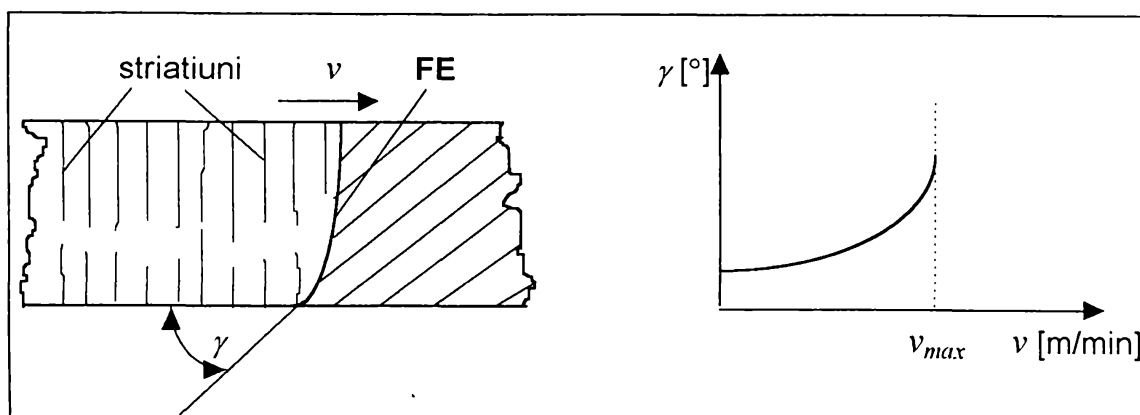


Fig.2.23

### 2.4.3. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin oxidare, topire și vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv

Este procedeul de TL la care gazul suflat coaxial cu FL este chimic activ, determinând [83],[85],[87],[88],[99]:

- creșterea absorbivității OP;
- eliberarea unei energii exoterme utilă procesului;
- evacuarea materialului erodat din zona tăieturii.

Acțiunea multifuncțională a jetului de gaz reactiv, de regulă O<sub>2</sub>, complică mult procesele ce au loc pe FE. TL având un caracter staționar, energia reacției exoterme de oxidare a materialului OP, poate fi inclusă în ecuațiile ce guvernează procesul sub forma acțiunii unei surse suplimentare de căldură de putere  $P_{OX}$ .

Materialele supuse TL prin oxidare, topire și vaporizare limitată pot fi grupate în două categorii:

a) materiale la care oxidarea poate fi menținută numai în prezența FL, numite materiale cu reacție de oxidare forțată;

b) materiale la care FL nu îndeplinește decât rolul de inițiator, asigurând numai încălzirea OP până la temperatura de oxidare,  $T_{OX}$ , după care, valoarea  $P_{OX}$  devine atât de mare, încât chiar fără absorbția în continuare de energie laser, devine posibilă asigurarea unei temperaturi suficient de ridicate pe suprafața OP, astfel încât procesul de oxidare să se întrețină; în această situație se află Ti, Zr, oțelul-carbon etc., numite materiale cu reacție de oxidare autosuținută.

Pentru inițierea regimului de oxidare autosuținută este necesar, pe de o parte, a spori accesul oxigenului spre zona de iradiere și, pe de altă parte, a asigura evacuarea produselor de reacție, cu atingerea unui domeniu de echilibru dinamic a acestora.

Prima dintre aceste cerințe este îndeplinită prin insuflarea coaxial cu FL a jetului de gaz reactiv.

Soluționarea adecvată a celei de a doua cerințe depinde de tipul concret de metal. Din acest punct de vedere, metalele cu reacție de oxidare autosuținută se împart în următoarele grupe:

a) grupa la care temperatura de oxidare este mai mică decât temperatura de topire ( $T_{OX} < T_T$ );



b) grupa la care  $T_{OX} > T_T$ , situație în care jetul de gaz produce evacuarea metalului lichid, împreună cu oxidul ce se formează pe suprafața sa; este cazul întâlnit la TL a Cu, Al și aliajelor acestora, precum și a OL [120], situație analizată în teza de doctorat prin modelare analitică și experimentală.

Din cele prezentate mai sus, rezultă că acest procedeu de TL oferă în plus față de particularitățile evidențiate în paragraful 2.4.1., următoarele:

- absorbivitatea OP este superioară celei de la TL în prezența gazului neutru, datorită prezenței oxizilor materialului;

- acțiunea gazului reactiv are rol de sursă termică, fapt ce obligă la introducerea în ecuația de conservare a energiei de pe FE a unui termen suplimentar; de asemenea, datorită acestei particularități, diametrul sursei termice compuse (corespunzătoare acțiunii FL + jet de gaz reactiv) este în general mai mare decât cel al FL, ceea ce afectează lățimea tăieturii;

- formarea striatiunilor de pe pereții tăieturii are loc în modul următor [99]: FL aflat în mișcare relativă cu viteza  $v$  în raport cu OP și însoțit de jetul de gaz de lucru reactiv determină inițierea oxidării, topirii și vaporizării materialului într-un punct X (fig.2.24a), de la care reacția de oxidare se propagă cu viteză mai mare decât  $v$  (fig.2.24b), depășind PF (fig.2.24c), până într-o zonă în care reacția nu mai este capabilă să se autoîntrețină și este reluată abia în momentul în care intensitatea FL în mișcare atinge valoarea necesară redeclanșării ei (fig.2.24d), după care procesul se repetă periodic (fig.2.24e); modificarea amplitudinii și frecvenței striatiunilor se poate realiza de regulă prin adoptarea unui regim de funcționare pw a laserului, subiect ce nu se abordează în teza de doctorat.

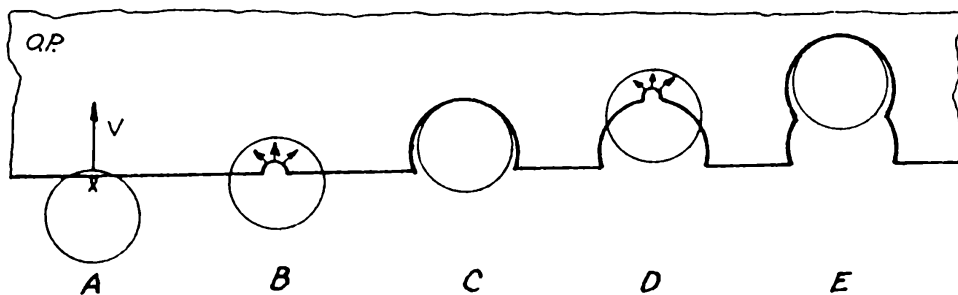


Fig.2.24

#### 2.4.4. Formarea frontului de eroziune la tăierea laser prin descompunere termochimică

Această **TL** este caracteristică materialelor polimerice, dar și lemnului și materialelor celulozice, materialelor textile, pieilor naturale etc., mecanismul descompunerii termochimice modificându-se de la un material la altul, funcție de natura acestuia [22],[40],[44],[63],[98],[103],[104],[113].

În teza de doctorat este tratat însă numai cazul materialelor polimerice termoplaste și, în particular, al **PMMA** (cunoscut mai ales prin denumirea sa comercială plexiglas), ca unul dintre cele mai întâlnite materiale nemetalice la **TL**. În cazul acestui material, produsele rezultate în urma descompunerii termochimice generată de absorbția **FL** sunt în proporție de peste 98% sub formă de vapori, ceea ce duce în final, prin absența practic a fazei lichide la calități excepționale ale tăieturilor. Formarea **FE** la **TL** a **PMMA** prezintă următoarele particularități:

- forma **FL** ca sursă termică este cea amintită în paragraful 2.4.2;
- absorbtivitatea materialului este ridicată, apropiindu-se de unitate (vezi 2.2.2);
- conducția termică este practic neglijabilă;
- jetul de gaz de lucru are numai rolul de îndepărtare a puținelor produse rezultate în urma **TL** și care nu sunt sub formă de vapori;
- neexistând practic fază lichidă, și nici reacții exoterme, nu rezultă nici striatiuni pe pereții tăieturii.

În aceste condiții, formarea **FE** este rezultatul unui proces relativ simplu, forma **FE** într-o secțiune paralelă cu suprafața **OP** și respectiv perpendiculară pe aceasta fiind cea din fig.2.21a și respectiv 2.21b.

### **2.5. Concluzii**

Cele prezentate mai sus, permit formularea următoarelor concluzii, utilizate în capitolele următoare pentru atingerea obiectivului tezei de doctorat:

- a) optimizarea tehnologiei de **TL** a materialelor nu poate fi făcută eficient exclusiv pe baza unor modele analitice, deoarece:

- **FL** pot fi definite corect si complet ca agenți erozivi numai apelând la o mulțime de parametri, dintre care nu toți sunt stabili; este necesar deci, ca pe de o parte, în formularea ipotezelor pe baza cărora se vor elabora modelele analitice să fie explicit precizați toți acești parametri, iar pe de altă parte, instabilitatea lor să fie compensată prin modelare experimentală;

- absorbția radiației laser de către **OP** are loc în urma unui proces extrem de complex, absorbtivitatea materialelor fiind o mărime cu variații bruște de la o condiție particulară la alta, motiv pentru care este practic imposibilă determinarea analitică a acesteia; din acest motiv, în continuare se preferă, pentru cazul modelării analitice, fixarea unor valori ale absorbtivității, în conformitate cu cele prezentate în paragraful 2.2, modelarea experimentală urmând a suplini necunoașterea în detaliu a mecanismului absorbției;

- rezolvarea exactă a sistemului de ecuații diferențiale ce pot fi scrise pentru condițiile concrete ale unui anumit procedeu de **TL**, este practic imposibilă sau ineficientă din punct de vedere practic, motiv pentru care, soluția aproximativă (2.29) a ecuației Fourier, care are avantajul simplității în condițiile păstrării unei precizii mulțumitoare a estimărilor, va fi preferată în elaborarea modelelor analitice;

b) deoarece înțelegerea mecanismului fizic prin care are loc formarea **FE** în cazul fiecărui procedeu de **TL** analizat este de o importanță capitală pentru formularea ipotezelor si scrierea ecuațiilor de echilibru în vederea obținerii unor modele analitice utile, a fost detaliat acest mecanism pentru următoarele procedee de **TL**:

- **TL** prin topire si vaporizare limitată, cu suflarea unui gaz de lucru neutru;
- **TL** prin oxidare, topire si vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv;
- **TL** prin descompunere termochimică.

## CAPITOLUL 3

### MODELAREA ANALITICĂ A TĂIERII MATERIALELOR CU FASCICULE LASER CO<sub>2</sub> cw

#### 3.1. Factori de influență și funcții obiectiv la modelarea tăierii laser a materialelor

O etapă premergătoare modelării oricărui proces, obiect sau fenomen este stabilirea **FI** și a **FO** [25],[84],[102].

În capitolul anterior a fost prezentat procesul de **TL** ca rezultat al formării și deplasării după un contur dorit a **FE** generat de **FL** în **OP**. În vederea unei analize unitare a fenomenelor, în continuare va fi utilizat un sistem de referință cartezian, legat de **FL**, cu următoarea orientare a axelor (fig.2.18):

- axa **z** de-a lungul direcției de propagare a **FL**, cu sensul pozitiv în sensul propagării **FL**;
- axa **x**, perpendiculară pe **z** și paralelă cu direcția mișcării relative **FL-OP**, cu sensul pozitiv în sensul mișcării **OP** (presupunând **FL** fix);
- axa **y** are direcția și sensul necesare definirii unui sistem de axe rectangular drept.

Originea sistemului de axe este considerată mobilă, iar poziția ei se precizează numai atunci când este necesar.

Procesul **TL** fiind considerat staționar (vezi 2.3. și 2.4.), nu este necesară precizarea unei origini a timpului.

Pornind de la cele prezentate în cap.2, rezultă, într-o manieră originală de punere a problemei, faptul că **TL** (în particular, CO<sub>2</sub> cw) este rezultatul acțiunii și interacțiunii unui număr de **FI** ce sunt elemente aparținătoare de trei mulțimi disjuncte:

- mulțimea **FI** ce țin de **FL**  $\Rightarrow$  **L** ;
- mulțimea **FI** ce țin de **OP** (material)  $\Rightarrow$  **M** ;
- mulțimea **FI** ce țin de gazul de lucru  $\Rightarrow$  **G** .

Aceste mulțimi sunt discrete și ele cuprind un număr finit de elemente evidențiate distinct (**E**) sau grupate în submulțimi sugestive (**S**). Particularizarea, fixarea acestor elemente și submulțimi individualizează o anumită aplicație concretă, practică de **TL**.

Din datele existente, se poate evidenția următoarea alcătuire a mulțimilor **L** , **M** și **G** (fără a pretinde că prin aceasta problema este epuizată):

$$\underline{\mathbf{L}} = \{ \mathbf{E}_{I,1} , \mathbf{E}_{I,2} , \mathbf{E}_{I,3} , \mathbf{E}_{I,4} , \mathbf{E}_{I,5} , \mathbf{E}_{I,6} , \mathbf{E}_{I,7} , \mathbf{S}_{I,1} , \mathbf{S}_{I,2} , \mathbf{S}_{I,3} \} \quad (3.1)$$

Mulțimea **L** conține  $N_L$  elemente:

- $\mathbf{E}_{I,1} \Rightarrow$  lungimea de undă a radiației laser;
- $\mathbf{E}_{I,2} \Rightarrow$  polarizarea;
- $\mathbf{E}_{I,3} \Rightarrow$  diametrul (dimensiunea transversală);
- $\mathbf{E}_{I,4} \Rightarrow$  distribuția modală;
- $\mathbf{E}_{I,5} \Rightarrow$  calitatea;
- $\mathbf{E}_{I,6} \Rightarrow$  puterea;
- $\mathbf{E}_{I,7} \Rightarrow$  divergența;
- $\mathbf{S}_{I,1} \Rightarrow$  natura mediului activ;
- $\mathbf{S}_{I,2} \Rightarrow$  modul de operare;
- $\mathbf{S}_{I,3} \Rightarrow$  stabilitatea parametrilor.

Este de precizat că în locul strălucirii, în **L** a fost inclusă puterea, ca fiind o mărime mai utilizată în practică; cele două mărimi sunt legate între ele prin relația (2.14).

$$\underline{\mathbf{M}} = \{ \mathbf{S}_{M1} , \mathbf{S}_{M2} , \mathbf{S}_{M3} \} \quad (3.2)$$

Mulțimea **M** conține  $N_M$  elemente:

- $\mathbf{S}_{M1} \Rightarrow$  natura materialului;
- $\mathbf{S}_{M2} \Rightarrow$  forma geometrică a **OP**;
- $\mathbf{S}_{M3} \Rightarrow$  starea suprafeței **OP**.

$$\underline{\mathbf{G}} = \{S_{G1}, S_{G2}, S_{G3}\} \quad (3.3)$$

Mulțimea  $\underline{\mathbf{G}}$  conține  $N_G$  elemente:

- $S_{G1} \Rightarrow$  natura gazului de lucru;
- $S_{G2} \Rightarrow$  parametrii de stare;
- $S_{G3} \Rightarrow$  forma jetului.

În absența unui sistem de axe de coordonate, cele trei mulțimi furnizează toți **FI** ce contribuie la **TL**. Realizarea efectivă a procesului de **TL** presupune însă și o anumită poziție relativă în spațiu a elementelor mulțimilor  $\underline{\mathbf{L}}$ ,  $\underline{\mathbf{M}}$  și  $\underline{\mathbf{G}}$  (pentru elementele pentru care noțiunea de poziție relativă are sens). Poziția relativă generează **FI** suplimentari pentru **TL**, factori care sunt reuniți într-o nouă mulțime,  $\underline{\mathbf{PR}}$ :

$$\underline{\mathbf{PR}} = \{S_{PR1}, S_{PR2}, S_{PR3}, S_{PR4}\} \quad (3.4)$$

Mulțimea  $\underline{\mathbf{PR}}$  conține  $N_{PR}$  elemente:

- $S_{PR1} \Rightarrow$  submulțimea generată de poziția relativă a elementelor mulțimilor  $\underline{\mathbf{L}}$  și  $\underline{\mathbf{M}}$ ; ca **FI** interesanți pentru **TL**, această submulțime conține:
  - $E_{LM1} \Rightarrow$  poziția relativă **SL-OP**;
  - $E_{LM2} \Rightarrow$  poziția relativă direcție **FL** - suprafață **OP**;
- $S_{PR2} \Rightarrow$  submulțimea generată de poziția relativă a elementelor mulțimilor  $\underline{\mathbf{L}}$  și  $\underline{\mathbf{G}}$ ; ca **FI** interesanți pentru **TL**, această submulțime conține:
  - $E_{LG1} \Rightarrow$  poziția relativă duză ieșire gaz - **FL**;
- $S_{PR3} \Rightarrow$  submulțimea generată de poziția relativă a elementelor mulțimilor  $\underline{\mathbf{M}}$  și  $\underline{\mathbf{G}}$ ; ca **FI** interesanți pentru **TL**, această submulțime conține:
  - $E_{MG1} \Rightarrow$  poziția relativă duză gaz - suprafață **OP**;
- $S_{PR4} \Rightarrow$  submulțimea generată de poziția relativă a elementelor mulțimilor  $\underline{\mathbf{L}}$ ,  $\underline{\mathbf{M}}$  și  $\underline{\mathbf{G}}$ ; ca **FI** interesanți pentru **TL**, această submulțime conține:
  - $E_{LMG1} \Rightarrow$  viteza mișcării relative **FL** - **OP**, numită viteză de tăiere.

Reuniunea mulțimilor  $\underline{\mathbf{L}}$ ,  $\underline{\mathbf{M}}$ ,  $\underline{\mathbf{G}}$  și  $\underline{\mathbf{PR}}$  formează mulțimea  $\underline{\mathbf{FI}}$ :

$$\underline{\mathbf{FI}} = \underline{\mathbf{L}} \cup \underline{\mathbf{M}} \cup \underline{\mathbf{G}} \cup \underline{\mathbf{PR}} \quad (3.5)$$

Tăietura este obținută ca rezultat al interacțiunii elementelor mulțimii **FI** și poate să fie privită pentru simplificarea analizei teoretice, ca având trei componente, **F**, **R** și **MS**, funcții analitice de variabile  $x, y, z$ , interesante din punct de vedere tehnologic și rezultate la rândul lor, ca o reuniune de funcții elementare:

- **F**( $x, y, z$ )  $\Rightarrow$  forma (geometria) tăieturii, care furnizează informații privind lățimea, paralelismul pereților etc.; cuprinde  $N_F$  funcții elementare;
- **R**( $x, y, z$ )  $\Rightarrow$  topografia suprafeței pereților tăieturii, care furnizează informații privind rugozitatea pereților tăieturii, striatiunile etc; cuprinde  $N_R$  funcții elementare;
- **MS**( $x, y, z$ )  $\Rightarrow$  microstructura tăieturii, care furnizează informații asupra aspectului microscopic constitutiv al ZIT; cuprinde  $N_{MS}$  funcții elementare.

Reuniunea mulțimilor **F**, **R** și **MS** alcătuiește mulțimea **FO**, adică **FO**  $\equiv$  **T** :

$$\mathbf{FO} = \mathbf{F} \cup \mathbf{R} \cup \mathbf{MS} \equiv \mathbf{T} \quad (3.6)$$

În contextul de mai sus, rezultă că, pentru orice problemă de **TL**, se pot face următoarele afirmații:

- particularizarea (fixarea) elementelor mulțimii **FI** poartă numele de formularea ipotezelor problemei de rezolvat;
- particularizarea relațiilor de legătură între elementele mulțimilor **FI** și **T** poartă numele de enunțarea ecuațiilor fundamentale ale problemei de rezolvat.

Dacă formularea ipotezelor problemei este obligatorie atât pentru modelele analitice cât și pentru cele experimentale, scrierea ecuațiilor este specifică doar modelelor analitice.

Teza de doctorat abordează în continuare, atât în cazul modelării analitice, cât și în cazul modelării experimentale aproape exclusiv elemente ale mulțimii **F** ( $x, y, z$ ), interesante din punct de vedere tehnologic, cum sunt: lățimea medie a tăieturii sau paralelismul pereților acesteia. În cazul modelării analitice se vor face și referiri la elemente ale mulțimii **R** ( $x, y, z$ ), ca o deschidere spre noi probleme ale modelării analitice a **TL**.

### 3.2 Ipoteze si ecuații fundamentale pentru modelarea analitică a tăierii laser

În contextul de mai sus, aceste probleme se reduc la particularizarea elementelor mulțimii **FI** si respectiv la particularizarea relațiilor de legătură între mulțimile **FI** si **T**. Prin fixarea elementelor mulțimii **FI** se delimitează problemele abordate de teza de doctorat de celelalte probleme de **TL** a materialelor.

#### a) Ipoteze:

##### Mulțimea **L**:

- $E_{1,1} = 10,6 \mu\text{m}$ ;
- $E_{1,2} \Rightarrow$  circulară;
- $E_{1,3} = 2w_0$ , calculabil cu relația 2.5; parametru variabil;
- $E_{1,4} \Rightarrow \text{TEM}_{00}$ ;
- $E_{1,5} \Rightarrow \text{FL ideal} \Rightarrow M^2 = 1$ ;
- $E_{1,6} = P_L$ , parametru variabil;
- $E_{1,7} = \text{zero}$ ;
- $S_{1,1} \Rightarrow \text{He:N}_2\text{:CO}_2$ ;
- $S_{1,2} \Rightarrow \text{cw}$ ;
- $S_{1,3} \Rightarrow$  perfectă.

##### Mulțimea **M**:

- $S_{M1} \Rightarrow$  omogen si izotrop, definit de constantele:  $K, C, \rho, \kappa$ ; se precizează pentru fiecare model;
- $S_{M2} \Rightarrow$  placă infinită, cu grosimea  $s$ , parametru variabil;
- $S_{M3} \Rightarrow$  caracterizată de constanta  $A$ ; se precizează pentru fiecare model.

##### Mulțimea **G**:

- $S_{G1} \Rightarrow$  neutru sau reactiv; se precizează pentru fiecare model;
- $S_{G2} \Rightarrow$  viteza  $v_G$  si presiunea  $p_G$ ; parametri variabili;
- $S_{G3} \Rightarrow$  cilindrică, de diametru egal cu al **FL**;

##### Mulțimea **PR**:

- $E_{LM1} \Rightarrow \text{SL pe suprafața OP} \Rightarrow \text{PF} = \text{SL}$ ;



- $\mathbf{E}_{LM2} \Rightarrow \mathbf{FL} \perp \mathbf{OP}$ ;
- $\mathbf{E}_{LG1} \Rightarrow$  coaxiale;
- $\mathbf{E}_{MG1} \Rightarrow$  duza la distanța  $z_d$ , constantă față de suprafața  $\mathbf{OP}$ ;
- $\mathbf{E}_{LMG1} = v$ , parametru variabil.

**b) Ecuatii fundamentale:**

- conservarea energiei în zona  $\mathbf{FE}$ ; deoarece s-a precizat mai sus că procesul se consideră staționar (independent de timp), această ecuație se poate scrie în termeni de putere:

$$P_C - P_P = 0 \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

în care:

$P_C$  [W]  $\Rightarrow$  puterea câștigată ;

$P_P$  [W]  $\Rightarrow$  puterea pierdută.

- conservarea masei în zona  $\mathbf{FE}$ ;

$$m_{Er} - m_{Ex} = 0 \quad [\text{kg}] \quad (3.8)$$

în care:

$m_{Er}$  [kg]  $\Rightarrow$  masa de material erodat;

$m_{Ex}$  [kg]  $\Rightarrow$  masa de material expulzat.

- ecuația conducției termice (2.29), pentru cazul  $\mathbf{TL}$  în ipotezele precizate.

Particularizarea termenilor care intervin în aceste ecuații se va face în cele ce urmează, pe baza fenomenologiei de formare a  $\mathbf{FE}$  prezentată în paragraful 2.4. pentru cazul fiecărui procedeu de  $\mathbf{TL}$  modelat în teza de doctorat:

- $\mathbf{TL}$  prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru;
- $\mathbf{TL}$  prin oxidare, topire și vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv;
- $\mathbf{TL}$  prin descompunere termochimică.

Astfel rezultă ecuațiile modelelor analitice, care furnizează dependențele între elementele mulțimilor  $\mathbf{FI}$  și  $\mathbf{T}$ . Pentru a da consistență acestor modele și pentru a putea reprezenta grafic dependențele considerate mai interesante din punct de vedere tehnologic, în cazul fiecărui model s-a ales câte un material reprezentativ pentru procedeul de  $\mathbf{TL}$  analizat ( $\mathbf{OL}$  sau  $\mathbf{PMMA}$ , definite pe baza  $S_{M1}$  și  $S_{M3}$ ). S-au definit

apoi domeniile de interes tehnologic pentru parametrii variabili  $w_0$ ,  $P_L$ ,  $s$ ,  $v$ ,  $v_G$  precizați în ipoteze și s-au trasat dependențele căutate.

Ca principal element al mulțimii  $\underline{T}$  a fost aleasă lățimea medie a tăieturii,  $b_m$ . Au fost comparate valorile rezultate din calcul cu cele determinate experimental. Alte FO vor fi precizate în cadrul paragrafelor ce urmează, pentru fiecare model în parte.

### 3.3. Model analitic al tăierii laser prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru

#### 3.3.1. Stabilirea dependenței analitice între $b_m$ și parametrii $P_L$ , $s$ și $v$

Scrierea relației de dependență între lățimea medie a tăieturii,  $b_m$ , ca element al mulțimii  $\underline{T}$  și parametrii de interes tehnologic:

- $E_{1,6}$   $\Rightarrow$  puterea FL,  $P_L$ ;
- $S_{M2}$   $\Rightarrow$  grosimea OP,  $s$ ;
- $E_{1,MG1}$   $\Rightarrow$  viteza de tăiere,  $v$ ;

ca elemente ale mulțimii  $\underline{FI}$ , pentru acest procedeu de TL se face într-un mod original, care are la bază fenomenologia formării FE descrisă în paragraful 2.4.2. precum și ipotezele prezentate în paragraful 3.2.

În plus față de aceste ipoteze, se presupune că numai o parte din secțiunea transversală a FL, notată cu  $\eta$  este utilizată la încălzirea materialului OP. Determinarea fracțiunii  $\eta$  este detaliată în anexa 1.

Presupunând că pe suprafața FE (fig.2.20) se atinge temperatura de vaporizare,  $T_V$  a materialului OP, în ecuația conservării energiei (3.7), termenii  $P_C$  și  $P_P$  dobândesc următoarea formă:

$$P_C = A \cdot \eta \cdot P_L \quad [\text{W}] \quad (3.9)$$

și

$$P_P = P_L + P_{CT} \quad [\text{W}] \quad (3.10)$$

în care:

$P_l$  [W]  $\Rightarrow$  debitul energetic necesar încălzirii și topirii **OP**;

$P_{CT}$  [W]  $\Rightarrow$  debitul pierderilor prin conducție termică în **OP**.

Debitul energetic necesar aducerii materialului **OP** de la temperatura ambiantă,  $T_0$  la o temperatură  $T_m$ , având valoarea egală cu media între temperatura de vaporizare,  $T_V$  (atinsă de **FE**) și cea de topire,  $T_T$  (atinsă de **FT**), se poate calcula cu relația:

$$P_l = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_m - T_0) + \lambda_T] \quad [\text{W}] \quad (3.11)$$

în care:

$$T_m = \frac{T_T + T_V}{2} \quad [\text{K}] \quad (3.12)$$

Conform ecuației (2.29), debitul pierderilor prin conducție termică în **OP**, datorită formei semicilindrice, de diametru  $b_m$  a **FT**, se pot calcula cu relația:

$$P_{CT} = 2\pi \cdot s \cdot K \cdot (T_T - T_0) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)}{K_0\left(\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)} \quad [\text{W}] \quad (3.13)$$

Toate mărimile ce intervin în ecuațiile (3.11), (3.12) și (3.13) au fost definite anterior.

Înlocuind (3.9), (3.11) și (3.13) în (3.7) rezultă explicit legătura analitică între  $P_L$ ,  $v$ ,  $s$  și  $b_m$  pentru cazul **TL** prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru:

$$A \cdot \eta \cdot P_L = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_m - T_0) + \lambda_T] + 2\pi \cdot s \cdot K \cdot (T_T - T_0) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)}{K_0\left(\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)} \quad [\text{W}] \quad (3.14)$$

Relația (3.14) poate fi utilizată pentru reprezentarea grafică a dependenței analitice amintită mai sus pentru orice material tăiat cu laser în condițiile precizate prin ipotezele care au condus la scrierea (3.14).

Ca material reprezentativ pentru acest procedeu de **TL** este ales **OL**, caracterizat (conform cap.2 și 3.2) prin următoarele valori:

-  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$ ;

-  $\lambda_T = 273 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ ;

- $C = 460 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ;
- $\kappa = 0,11 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- $K = 39 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ;
- $T_0 = 293 \text{ K}$ ;
- $T_T = 1806 \text{ K}$ ;
- $T_V = 3023 \text{ K}$ ;
- $A = 0,25$ .

Deoarece operarea efectivă cu funcția Bessel  $K_0$  este relativ dificilă, pentru determinarea valorilor acestei funcții se propun următoarele relații aproximative:

$$K_0(q) = 0,49263 \cdot q^{-0,764514} \quad , q \in (0, 1] \quad (3.15)$$

și

$$K_0(q) = \sqrt{\frac{\pi}{2q}} \cdot \exp(-q) \cdot \left[ 1 - \frac{1^2}{1! \cdot 8q} + \frac{3^2}{2! \cdot (8q)^2} \right] \quad , q > 1 \quad (3.16)$$

Parametrii variabili  $P_L$  și  $v$  se presupune că aparțin următoarelor intervale de interes practic:  $P_L \in [200, 2500] \text{ W}$ ,  $v \in [0,5, 5] \text{ m/min}$ .

În aceste condiții, s-au trasat cu ajutorul programului STATGRAPHICS dependențele funcționale  $b_m = f(P_L, v)$ , pentru diferite grosimi  $s$  ale **OP**, prezentate în fig. 3.1.-3.5:

- fig. 3.1: suprafața de răspuns  $b_m = f(P_L, v)$ , pentru  $s = 1 \text{ mm}$ , în scopul evidențierii formei acestei suprafețe, formă păstrată și pentru celelalte grosimi  $s$ ;

- fig.3.2...fig.3.5: curbele de nivel constant, obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale; aceste curbe permit identificarea lățimii medii a tăieturii,  $b_m$  atunci când se cunosc puterea **FL**,  $P_L$ , viteza de tăiere,  $v$ , și grosimea **OP**,  $s$ ;

- pentru compararea valorilor determinate analitic cu cele măsurate, grosimea **OP** a fost aleasă:  $s = 1 \text{ mm}$  (fig.3.2),  $s = 1,2 \text{ mm}$  (fig.3.3),  $s = 1,5 \text{ mm}$  (fig.3.4) și  $s = 1,7 \text{ mm}$  (fig.3.5).

Trasarea curbelor din fig.3.2...fig.3.5 s-a făcut presupunându-se valoarea  $\eta = 1$ . Cu ajutorul valorilor lui  $\eta$  determinate pentru fiecare condiție particulară pe baza anexei 1, se aduc corecțiile necesare, în tab.3.1 apărând comparativ valorile calculate

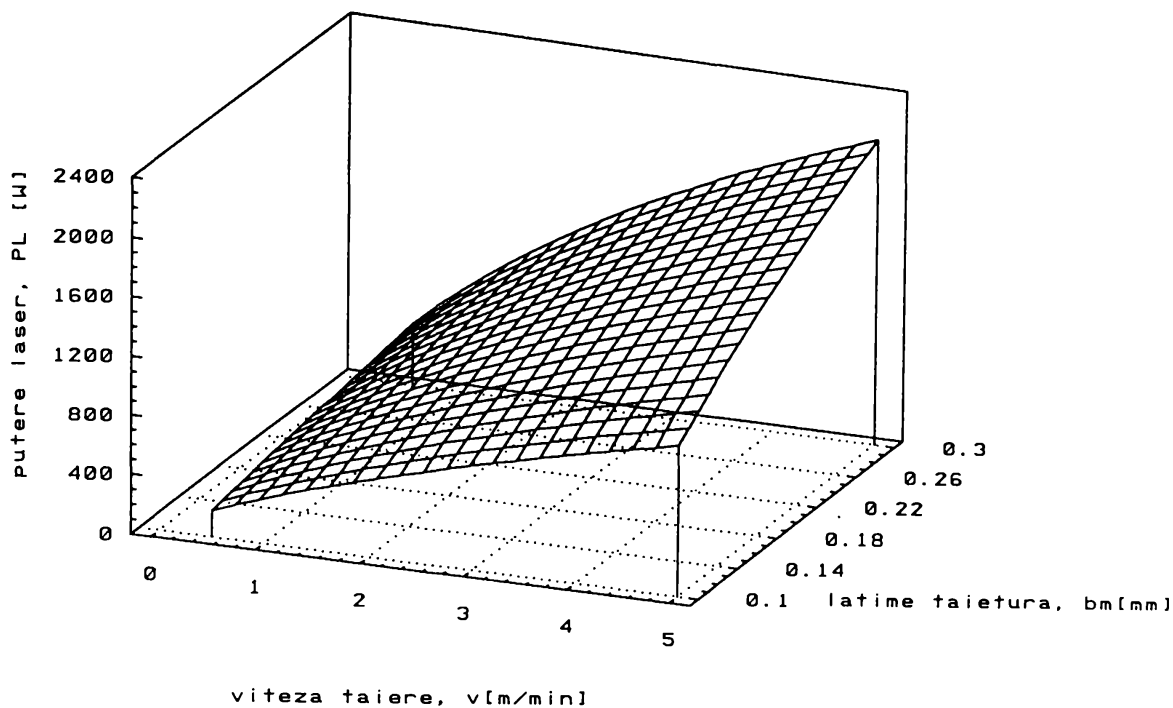


Fig.3.1

și cele experimentale (vezi cap.4). Se observă o apropiere mulțumitoare între valorile măsurate și cele calculate, astfel încât, chiar dacă curbele din fig. 3.2...fig.3.5

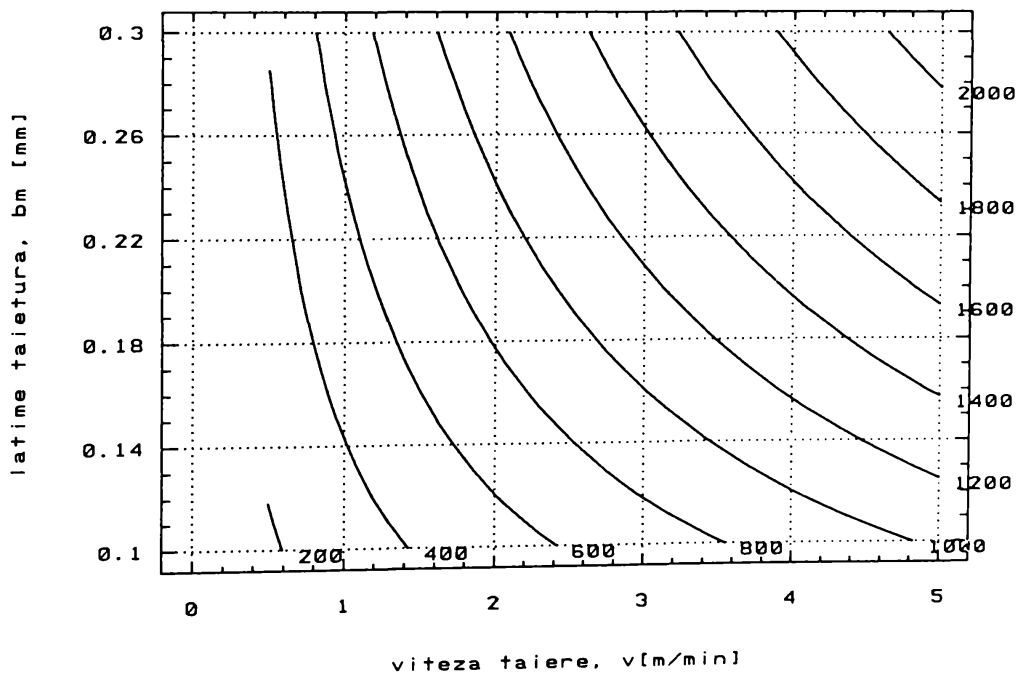


Fig.3.2

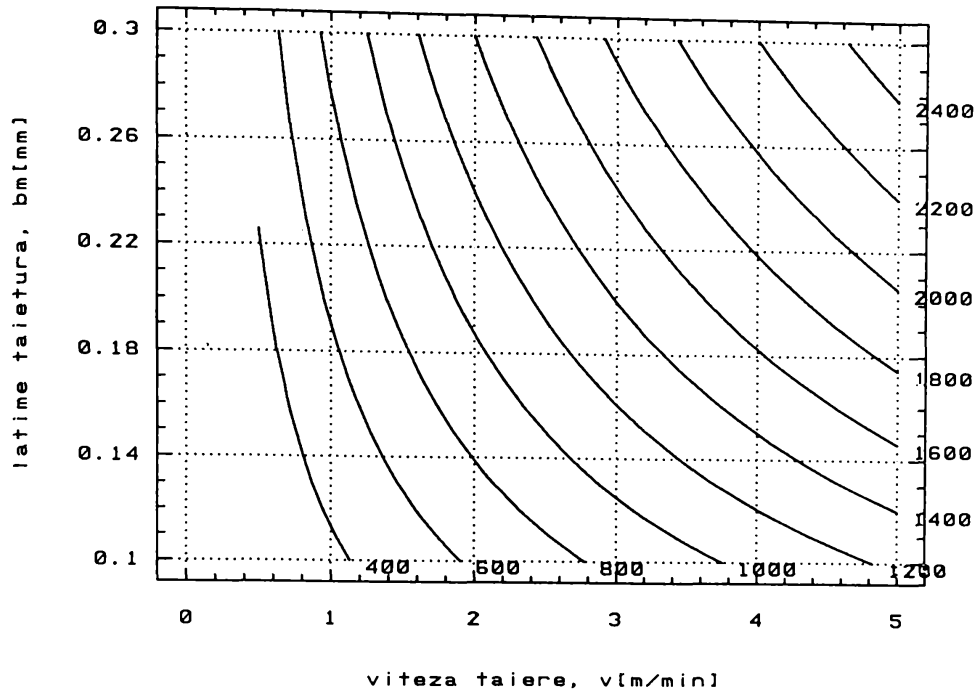


Fig.3.3

nu pot fi utilizate direct în evaluarea parametrilor tehnologici ai TL prin acest procedeu în vederea optimizării, cu certitudine pot furniza puncte centrale ale unor experimente pe baza cărora să se obțină modele empirice mult mai

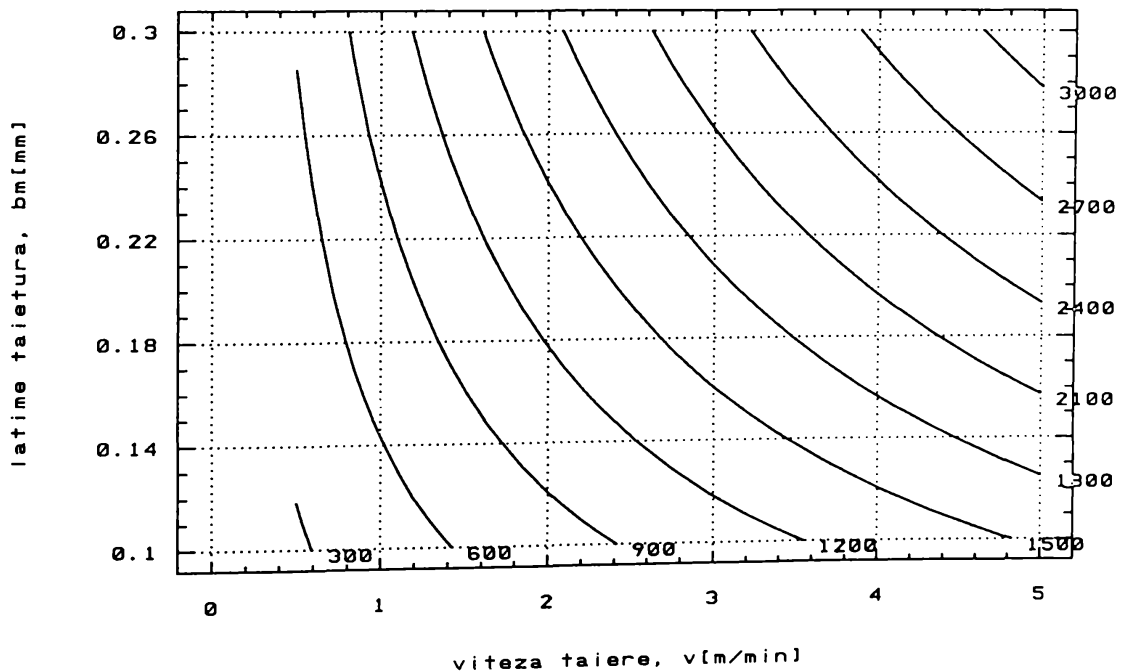


Fig.3.4

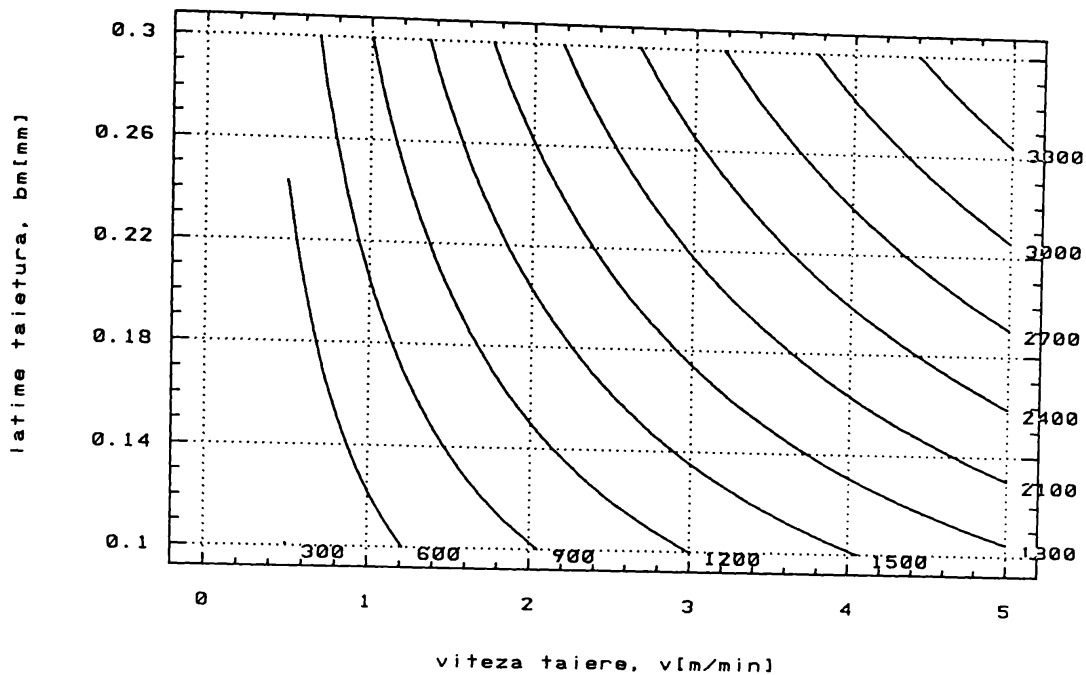


Fig.3.5

fidele, destinate optimizării tehnologiei TL. Conform celor precizate în cap.1 și cap.2, acesta a și fost scopul modelării analitice.

**Comparație între valorile calculate și cele experimentale**

Tabela 3.1

Nr. crt.	s [mm]	v [m/min]	$b_m$ [mm]	$\eta$ [-]	$P_L$ [W] calcul	$P_L$ [W] experiment
1.	1,0	4	0,19	0,95	1441	1400
2.	1,2	1	0,24	0,60	1193	1200
3.	1,2	1	0,19	0,70	855	1000
4.	1,5	1	0,18	0,95	740	800
5.	1,7	2	0,10	0,95	857	800
6.	1,0	4	0,22	0,98	1516	1200
7.	1,0	1	0,26	0,40	1562	1400
8.	1,2	2	0,21	0,70	1551	1400

**3.3.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere și grosimii materialului tăiat**

Pe baza unor ipoteze simple, se poate aproxima grosimea maximă de material ce poate fi tăiat în condiții date sau viteza maximă **FL-OP** care asigură, în condiții precizate, tăierea completă a materialului:

- TL are loc prin fenomenologia prezentată în paragraful 2.4.2. dar pierderile prin conducție termică se neglijează ( $P_{cr} = 0$ ), considerându-se că întreaga energie laser absorbită este utilizată pentru încălzirea materialului și topirea acestuia:

- întreaga secțiune a FL este utilizată pentru încălzirea materialului ( $\eta = 1$ );
- expulzarea materialului se face exclusiv în stare topită, la temperatura  $T_T$  ;
- ținând cont de distribuția reală gaussiană a intensității pe secțiunea FL, orice îndepărtare de la axa tăieturii duce la scăderea drastică a energiei laser transferată materialului OP, deci și a temperaturii, care coboară sub  $T_T$  ; în aceste condiții, lățimea medie a tăieturii  $b_m$  , se consideră a fi egală cu diametrul SL pentru un FL ideal,  $2w_0$  .

Pe baza acestor ipoteze, și ținând seama de distribuția gaussiană a intensității FL, din ecuația conservării energiei (3.7), rezultă:

$$A \cdot P_L = \sqrt{\pi} \cdot w_0 \cdot \rho \cdot s \cdot v \cdot [C \cdot (T_T - T_0) + \lambda_T] \quad [\text{W}] \quad (3.17)$$

Din relația (3.17) rezultă că grosimea maximă a materialului ce poate fi tăiat este proporțională cu raportul  $P_L / v \cdot w_0$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ], care reprezintă energia primită de unitatea de suprafață a FE.

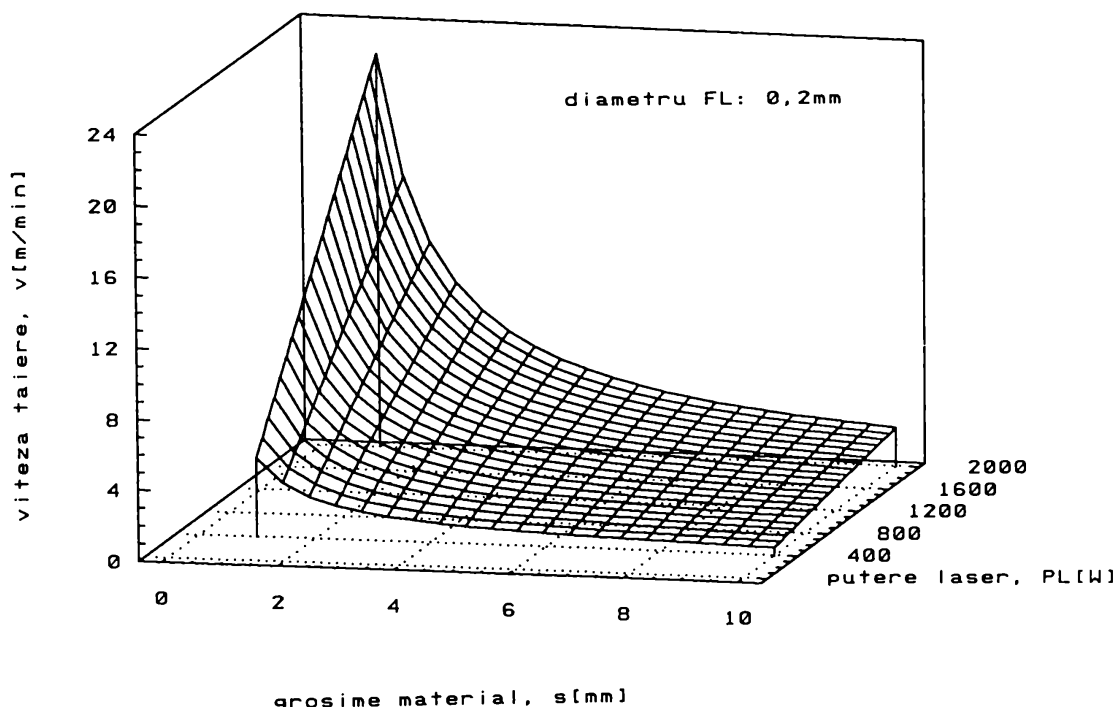


Fig.3.6



Pentru reprezentarea grafică a relației (3.17) a fost ales tot **OL**, caracterizat prin valorile constantelor precizate în paragraful anterior, rezultând:

- fig.3.6, care prezintă forma suprafeței de răspuns  $v = f(s, P_L)$ , pentru un FL cu diametrul  $2w_0 = 0,2$  mm;

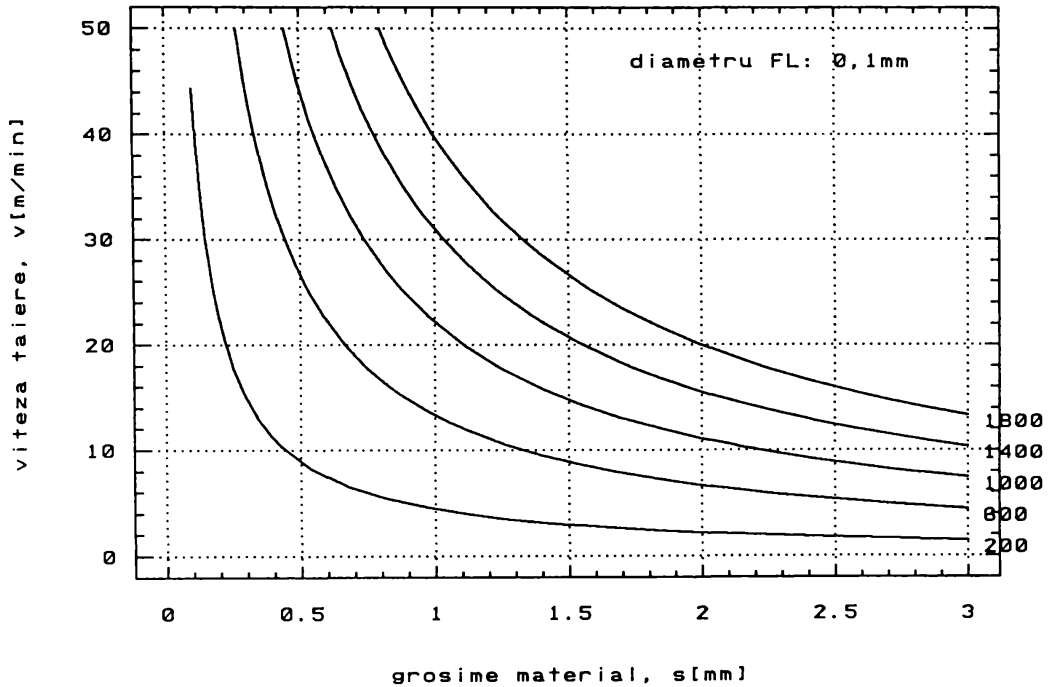


Fig.3.7

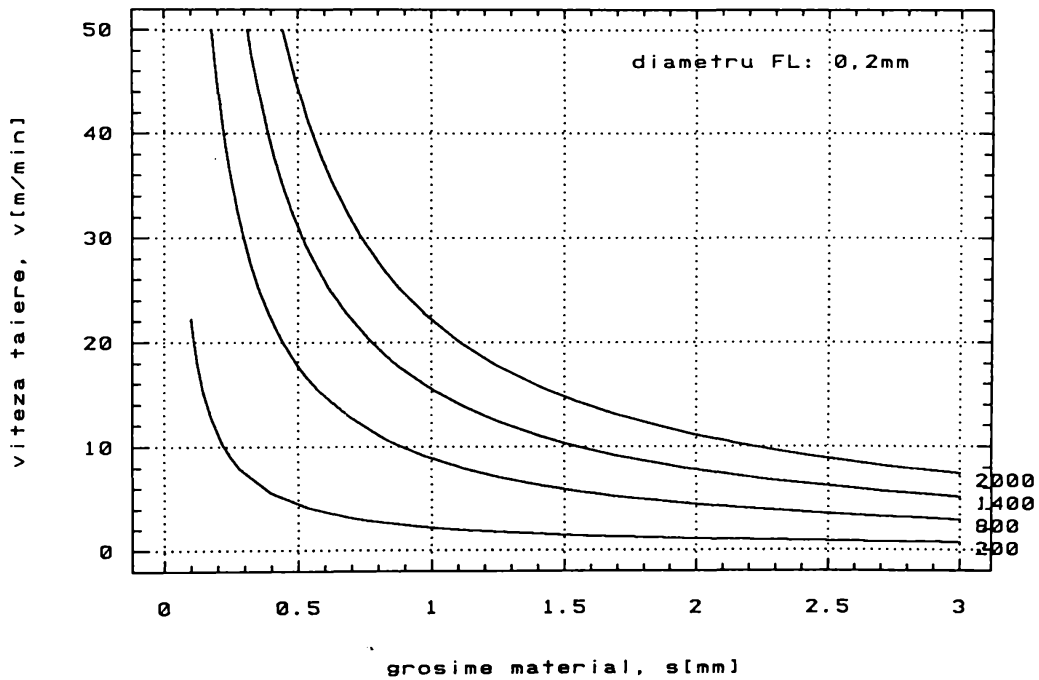


Fig.3.8

- fig.3.7 si 3.8, care prezintă dependența  $v = f(s)$ , pentru diferite valori ale  $P_L$  si  $2w_0$ , obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns de tipul celei prezentate în fig.3.6 cu plane verticale.

Valorile parametrilor  $v$ ,  $s$ ,  $P_L$  si  $w_0$  s-au ales în domeniul de interes practic la TL a OL. Curbele din fig.3.7 si fig.3.8 sunt de mare utilitate în aprecierea primară rapidă a valorilor limită ce pot fi atinși la TL a OL.

### 3.3.3. Calculul grosimii stratului de material topit

Datorită faptului că la TL prin topire si vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru, stratul de material topit este răspunzător de formarea elementelor mulțimii **F** si mai ales **R** (paragrafele 2.4 si 3.1), în continuare se determină grosimea acestui strat,  $h$ , între FE si FT (fig. 2.20).

Grosimea maximă a stratului de material topit,  $h_{max}$ , se obține în situația în care:

- FE a ajuns la  $T_V$ , dar nu există încă material vaporizat;
- gazul de lucru nu îndepărtează materialul topit ( $p = 0$ );
- întreaga energie primită de FE este utilizată pentru încălzirea materialului ( $P_{CT} = 0$ ).

Aplicând ipotezele de mai sus la ecuația conservării energiei pentru stratul de material topit si ținând seama de faptul că grosimea acestui strat variază cu unghiul  $\beta$  (fig.2.21 si fig.2.22), rezultă:

$$h_{max} = \frac{K \cdot (T_V - T_T)}{\rho \cdot v \cdot \cos \beta \cdot [C \cdot (T_T - T_0) + \lambda_T]} \quad [\text{m}] \quad (3.18)$$

Pentru cazul OL având valorile parametrilor termofizici precizați în paragraful 3.3.1., evoluția lui  $h_{max}$ , funcție de viteza de tăiere,  $v$ , si unghiul  $\beta$  este reprezentată în fig.3.9.

Situația prezentată se complică mult dacă presiunea gazului de lucru  $p \neq 0$ . Fără a lua în considerare efectul de răcire provocat de gazul de lucru (vezi 2.4), grosimea stratului topit,  $h$ , poate fi estimată teoretic astfel:

- se alege un sistem de axe de coordonate  $x_1O_1y_1$  (fig.3.10), având axa  $O_1x_1$  de-a lungul FT;

- se notează cu  $u_l(x_l, y_l, t)$  viteza de mișcare a stratului topit în lungul axei  $O_1x_1$  și cu  $v_l(x_l, y_l, t)$  viteza de mișcare a stratului topit în lungul axei  $O_1y_1$ ;

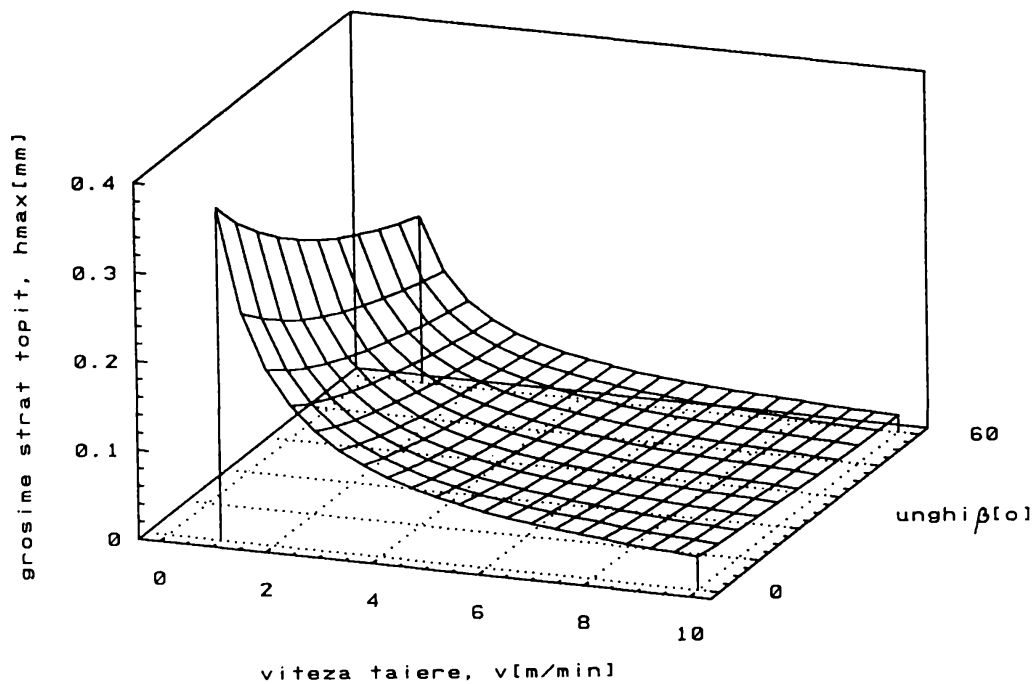


Fig.3.9

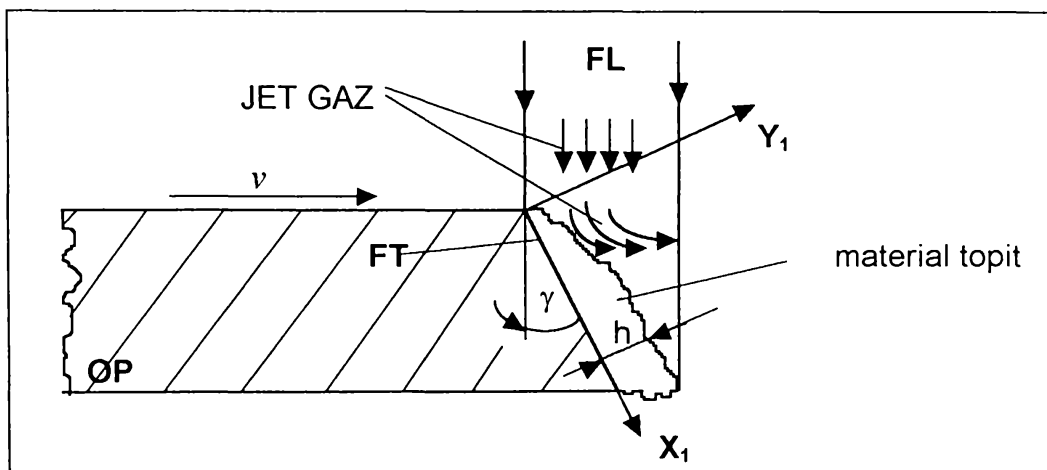


Fig.3.10

- se scriu următoarele ecuații:

a) ecuațiile de mișcare ale stratului de material topit:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial y_1} = 0 \quad [s^{-1}] \quad (3.19)$$

$$\rho_T \cdot \left( \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + v_1 \cdot \frac{\partial v_1}{\partial y_1} \right) = \eta_T \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial y_1^2} - \frac{\partial p_T}{\partial x_1} \quad [\text{N} / \text{m}^3] \quad (3.20)$$

b) condițiile la limită pe **FT** și **FE**:

$$u_1 = v \cdot \cos \gamma \quad [\text{m} / \text{s}] \quad (3.21)$$

$$v_1 = v \cdot \cos \gamma \quad [\text{m} / \text{s}] \quad (3.22)$$

$$p_T = p + \frac{\sigma_T}{r_T} \quad [\text{N} / \text{m}^2] \quad (3.23)$$

$$\eta_T \cdot \frac{\partial u_1}{\partial y_1} = \tau_T \quad [\text{N} / \text{m}^2] \quad (3.24)$$

c) conservarea masei pe **FE** (se neglijează vaporizarea materialului):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_1 \cdot \frac{\partial h}{\partial x_1} = v_1 \quad [\text{m} / \text{s}] \quad (3.25)$$

În ecuațiile de mai sus s-au utilizat următoarele notații:

- $\rho_T$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  $\Rightarrow$  densitatea materialului topit;
- $\eta_T$  [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ]  $\Rightarrow$  viscozitatea dinamică a materialului topit;
- $p_T$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  $\Rightarrow$  presiunea în zona materialului topit;
- $\sigma_T$  [ $\text{N}/\text{m}$ ]  $\Rightarrow$  tensiunea superficială a materialului topit;
- $r_T$  [ $\text{m}$ ]  $\Rightarrow$  raza de curbură a suprafeței materialului topit;
- $\tau_T$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]  $\Rightarrow$  componenta tangențială a forței de frecare jet gaz - suprafață material topit

Rezolvarea sistemului format din ecuațiile (3.19)...(3.25) permite descrierea mișcării stratului de material topit, în ipoteza cunoașterii forțelor datorate jetului de gaz de lucru. Literatura de specialitate [123], arată că grosimea stratului de material topit în regim staționar,  $h$ , poate fi găsită, în contextul celor de mai sus, ca soluția pozitivă a ecuației:

$$\frac{h^3}{h_p^3} + \frac{h^2}{h_r^2} - 1 = 0 \quad [-] \quad (3.26)$$

în care:

$$h_p^3 = \frac{6 \cdot \eta_T \cdot v \cdot s^2}{\rho_G \cdot v_G} \quad [\text{m}^3] \quad (3.27)$$

$$h_t^2 = \frac{2 \cdot \eta_T \cdot v \cdot s^{1,5}}{\sqrt{\rho_{GS} \cdot \eta_{GS} \cdot v_G^3}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.28)$$

unde s-au folosit următoarele notații:

- $\rho_G$  [kg/m<sup>3</sup>]  $\Rightarrow$  densitatea gazului de lucru la ieșirea din duză;
- $v_G$  [m/s]  $\Rightarrow$  viteza gazului de lucru la ieșirea din duză;
- $\rho_{GS}$  [kg/m<sup>3</sup>]  $\Rightarrow$  densitatea gazului de lucru pe suprafața materialului topit;
- $\eta_{GS}$  [kg/m · s]  $\Rightarrow$  viscozitatea dinamică a gazului de lucru pe suprafața materialului topit.

Pentru reprezentarea grafică a dependenței grosimii stratului de material topit,  $h$ , funcție de viteza de tăiere,  $v$ , și viteza gazului,  $v_G$ , în cazul TL a OL în prezența unui gaz de lucru neutru (N<sub>2</sub>), se acceptă valorile:

- $\eta_T = 5 \cdot 10^{-3}$  kg/m · s;
- $\rho_G = 1,3$  kg/m<sup>3</sup>;
- $\rho_{GS} = 0,2$  kg/m<sup>3</sup>;
- $\eta_{GS} = 4,5 \cdot 10^{-5}$  kg/m · s, rezultând graficul din fig.3.11.

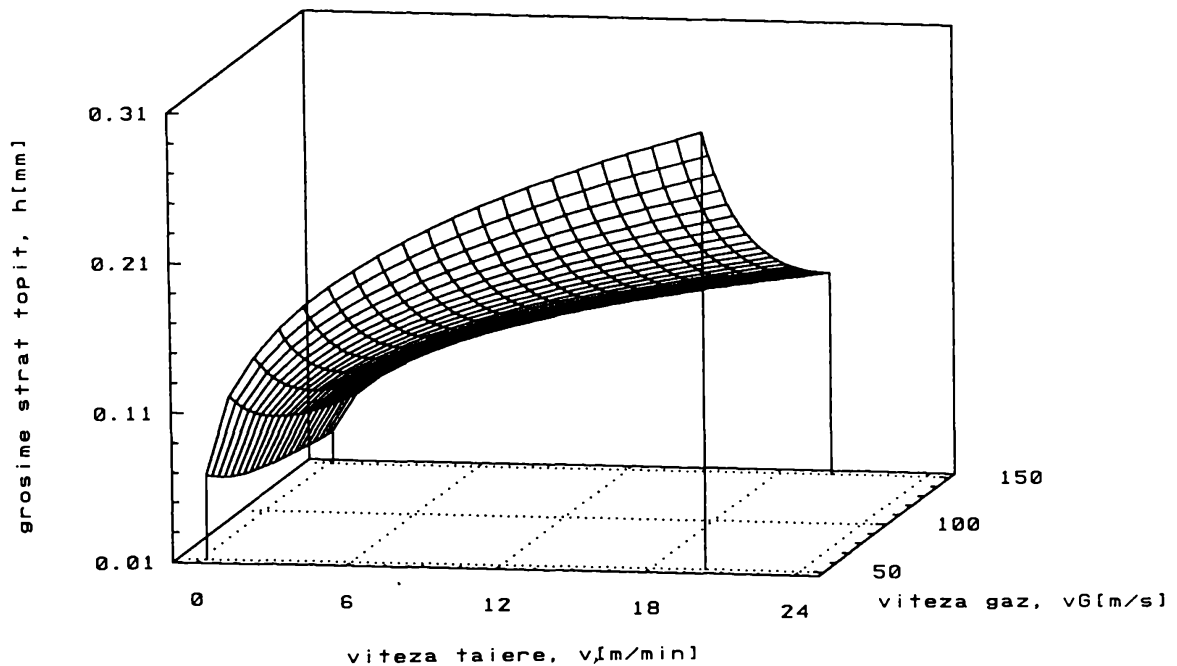


Fig.3.11

Prin secționarea suprafeței de răspuns din fig.3.11 cu plane verticale, se obțin curbele din fig.3.12.

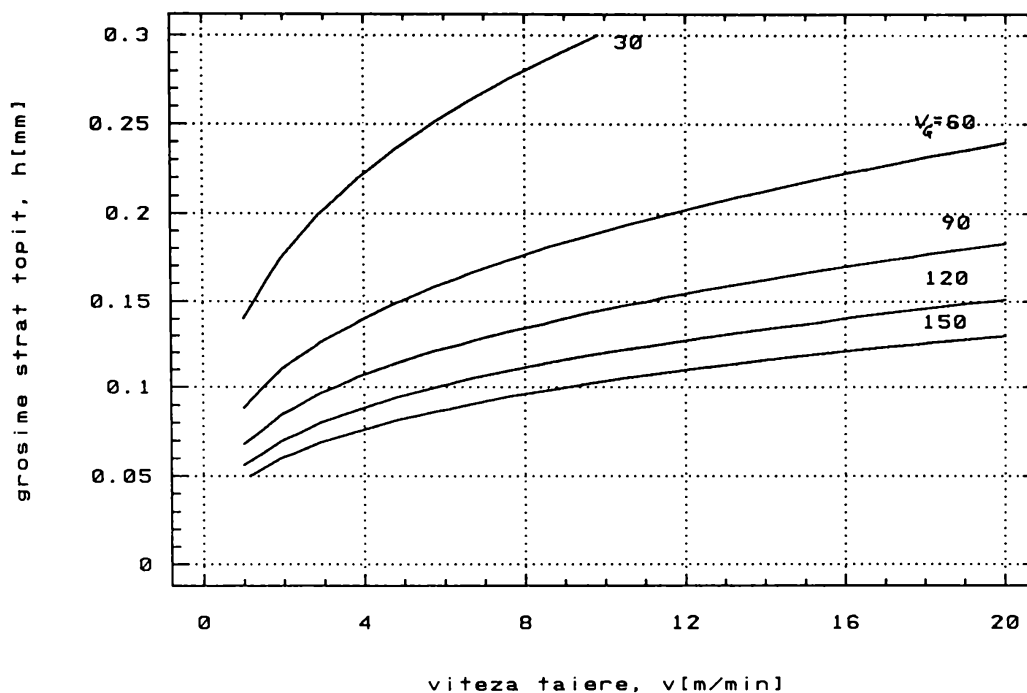


Fig.3.12

Spre deosebire de situația prezentată în fig.3.10, unde aportul de energie este considerat constant, la trasarea curbelor din fig.3.11 și 3.12 s-a presupus că se menține constantă rata topirii, deci puterea FL se ajustează funcție de viteza de tăiere.

În contextul celor de mai sus, din analiza fig.3.10, fig.3.11 și fig.3.12 rezultă că:

- grosimea stratului topit,  $h$ , scade cu creșterea vitezei de tăiere dacă aportul energetic se menține constant (fig.3.10), dar crește cu creșterea acestei viteze dacă este menținută o rată constantă a topirii (fig.3.11 și fig.3.12), deoarece astfel se produce mai mult material topit în unitatea de timp;

- grosimea stratului topit scade cu creșterea vitezei gazului de lucru, ca urmare a unei evacuări mai eficiente a materialului; evident, valoarea maximă a acestui strat se atinge la viteza gazului de lucru,  $v_G = 0$ ;

- grosimea stratului de material topit scade din axa tăieturii către pereții acesteia după relația:

$$h = h_{\max} \cdot \cos \beta \quad [\text{m}] \quad (3.29);$$

se obține astfel, pentru diferite valori ale lui  $h_{\max}$  suprafața de răspuns din fig.3.13.

care confirmă dependența grosimii stratului de material topit de unghiul  $\beta$  prezentată în fig.2.22a.

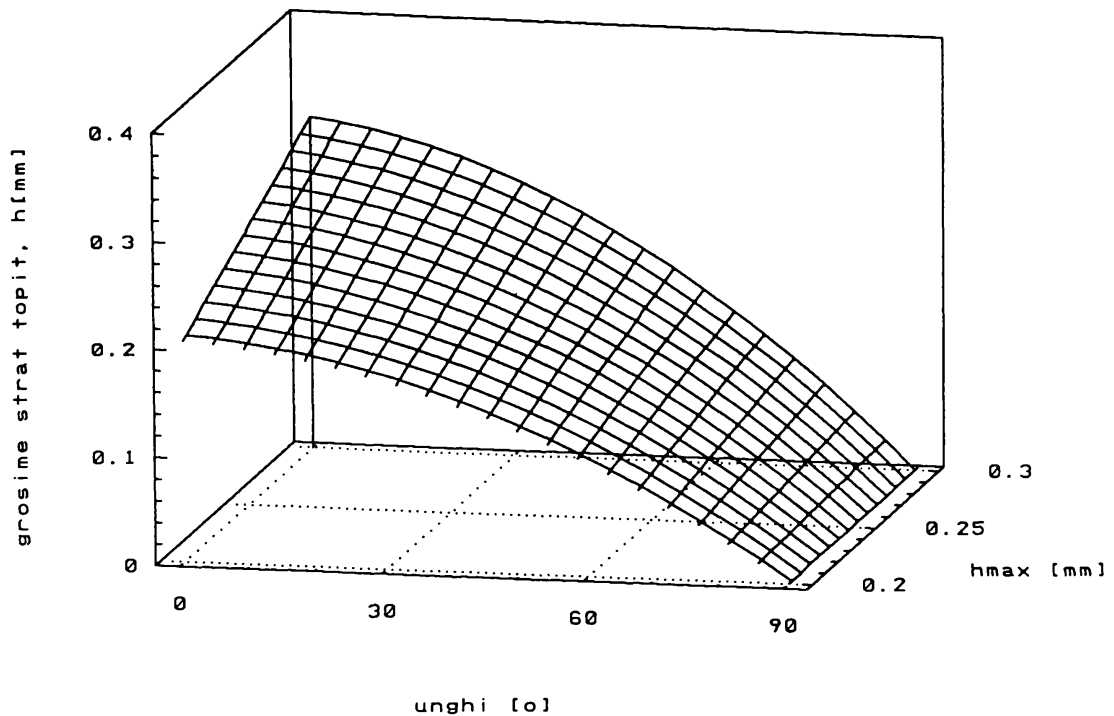


Fig.3.13

Pornind de la modelul analitic prezentat în acest paragraf se poate aborda în continuare problema modelării experimentale în vederea optimizării TL având ca FO elemente ale mulțimii  $\mathbf{R}$ . Aceasta reprezintă o deschidere pentru studii și cercetări viitoare, nefiind inclusă printre subiectele tezei de doctorat.

### 3.4 Model analitic al tăierii laser prin oxidare, topire și vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv

#### 3.4.1. Stabilirea dependenței analitice între $b_m$ și parametrii $P_{L,s}$ și $v$

Ca și în cazul modelului analitic al TL prezentat în paragraful 3.3.1, pe baza fenomenologiei descrisă în paragraful 2.4.3, precum și a ipotezelor prezentate în paragraful 3.2, se realizează într-un mod original stabilirea dependenței (interesantă din punct de vedere tehnologic) între:

-  $E_{1,6} \Rightarrow$  puterea FL,  $P_L$  ;

- $S_{M2} \Rightarrow$  grosimea **OP**,  $s$ ;
- $E_{LMG1} \Rightarrow$  viteza de tăiere,  $v$ ,

ca elemente ale mulțimii **FI**, și lățimea medie a tăieturii,  $b_m$ , ca element al mulțimii **T**.

Pentru fracțiunea din secțiunea transversală a **FL** care realizează încălzirea **OP**, se păstrează notația  $\eta$  (vezi anexa 1).

După cum s-a menționat în paragraful 2.4.3, procesele ce apar la **TL** prin acest procedeu sunt mult mai complicate față de cele de la **TL** prin topire și vaporizare limitată în prezența unui gaz neutru în principal datorită proceselor chimice de oxidare inițiate și menținute de insuflarea coaxial cu **FL** a gazului reactiv ( $O_2$ ).

Din punct de vedere al ecuației conservării energiei (3.7), în cazul acestui model, în teza de doctorat se consideră că termenii  $P_C$  și  $P_P$  dobândesc următoarea formă:

$$P_C = A \cdot \eta \cdot P_L + P_{OX} \quad [W] \quad (3.30)$$

și

$$P_P = P_I + P_{CT} \quad [W] \quad (3.31)$$

în care, în plus față de paragraful 3.3.1, s-a folosit notația :

$P_{OX} [W] \Rightarrow$  debitul energetic rezultat în urma reacției exoterme de oxidare a materialului **OP**:

$$P_{OX} = \rho \cdot v \cdot b_m \cdot s \cdot H_{OX} \quad [W] \quad (3.32)$$

în care:

$H_{OX} [J/kg] \Rightarrow$  reprezintă energia eliberată în timpul reacției exoterme de oxidare de către unitatea de masă de substanță a **OP**.

În cazul acestui model, prin  $P_I$  s-a notat debitul energetic necesar vaporizării materialului **OP** pe lățimea tăieturii, adică:

$$P_I = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_I - T_0) + \lambda_T + \lambda_I] \quad [W] \quad (3.33)$$

Pentru termenul  $P_{CT}$  se păstrează forma (3.13).

Utilizând expresiile (3.30)...(3.33) și (3.13), ecuația conservării energiei furnizează următoarea formă a legăturii analitice între mărimile  $P_L$ ,  $v$ ,  $s$  și  $b_m$



$$A \cdot \eta \cdot P_L = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_V - T_0) + \lambda_T + \lambda_V - H_{OX}] + 2\pi \cdot s \cdot K \cdot (T_T - T_0) \cdot \frac{\exp(-\frac{v \cdot b_m}{4\kappa})}{K_0(\frac{v \cdot b_m}{4\kappa})} \quad [\text{W}]$$

(3.34)

Relația (3.34) poate fi utilizată pentru reprezentarea grafică a dependenței analitice amintită mai sus pentru orice material tăiat cu laser în condițiile precizate prin ipotezele care au condus la scrierea (3.34).

Pentru cazul reprezentativ al **TL** a **OL** caracterizat prin parametrii termofizici  $\rho$ ,  $\lambda_T$ ,  $C$ ,  $\kappa$ ,  $K$ ,  $T_0$ ,  $T_T$ ,  $T_V$  având valorile precizate în paragraful 3.3.1, precum și  $\lambda_V = 6242 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$  (vezi tab.2.5), trebuie făcute următoarele precizări:

- în conformitate cu cele prezentate în paragrafele 2.2 și 2.4.2, pentru coeficientul de absorbție se alege valoarea  $A = 0,4$ ;

- dificultatea explicitării numerice a modelului analitic rezultă din faptul că valoarea  $H_{OX}$  este diferită funcție de oxidul care se formează; de exemplu [48]:

$$H_{OX} = 4,97 \cdot 10^6 \text{ J/kg în cazul formării FeO;}$$

$$H_{OX} = 6,65 \cdot 10^6 \text{ J/kg în cazul formării Fe}_3\text{O}_4;$$

- datorită faptului că pentru o anumită tăietură concret realizată, este practic imposibil să se precizeze apriori raportul dintre FeO și Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> rezultați, reprezentările grafice din fig.3.14...fig.3.16 s-au făcut în ipoteza că cei doi oxizi rezultă în proporții egale; la compararea rezultatelor măsurate cu cele determinate analitic (tab.3.2) s-a prezentat pe lângă valoarea medie pe baza căreia s-a făcut reprezentarea grafică și intervalul ce are ca limite valorile pentru care în urma reacției de oxidare ar rezulta numai FeO, respectiv numai Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;

- pentru determinarea valorilor funcției Bessel  $K_0$  s-au utilizat relațiile (3.15), respectiv (3.16).

- graficele au fost trasate utilizând programul STATGRAPHICS și ele reprezintă:

- fig. 3.14: suprafața de răspuns  $b_m = f(P_L, v)$ , pentru  $s = 1\text{mm}$ , în scopul evidențierii formei acestei suprafețe; forma seamănă cu cea din fig.3.1 și ea se păstrează practic pentru toate grosimile  $s$  ale **OP**;

- fig.3.15 și fig.3.16: curbele de nivel constant, obținute prin

secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale; aceste curbe permit, în general, determinarea unei mărimi dintre  $P_L$ ,  $v$ ,  $s$  și  $b_m$ , atunci când se cunosc sau se fixează celelalte trei;

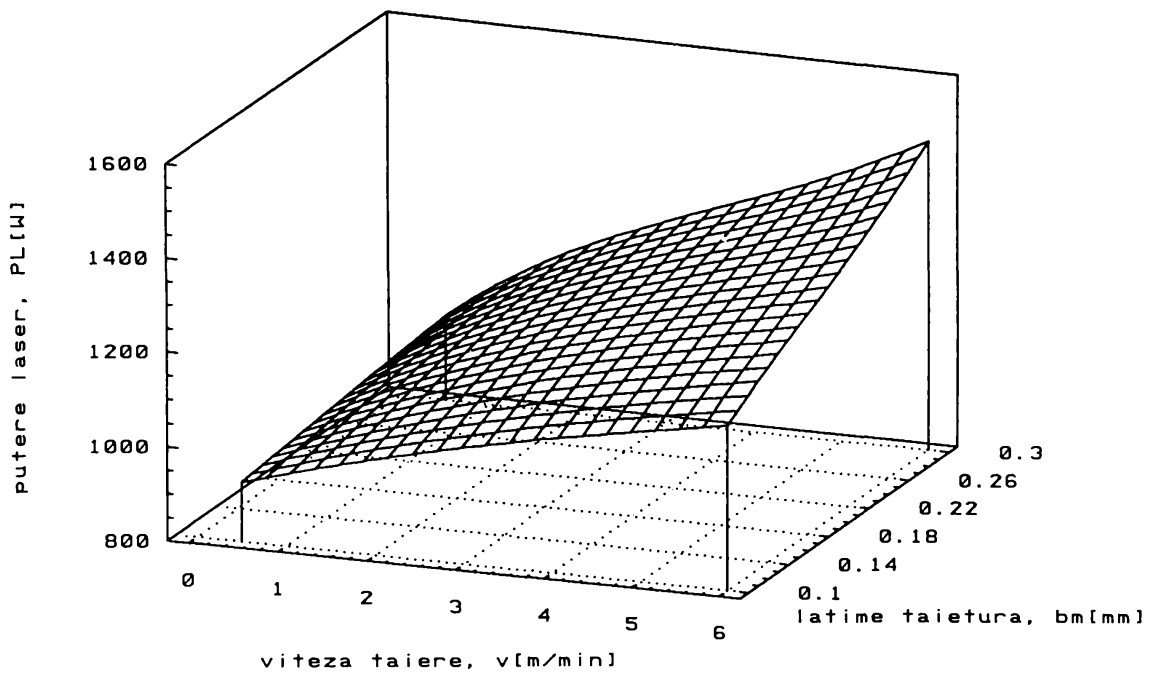


Fig.3.14

- pentru compararea valorilor determinate analitic cu cele măsurate, grosimea OP a fost aleasă:  $s = 1\text{mm}$  (fig.3.15) și  $s = 1,7\text{ mm}$  (fig.3.16).

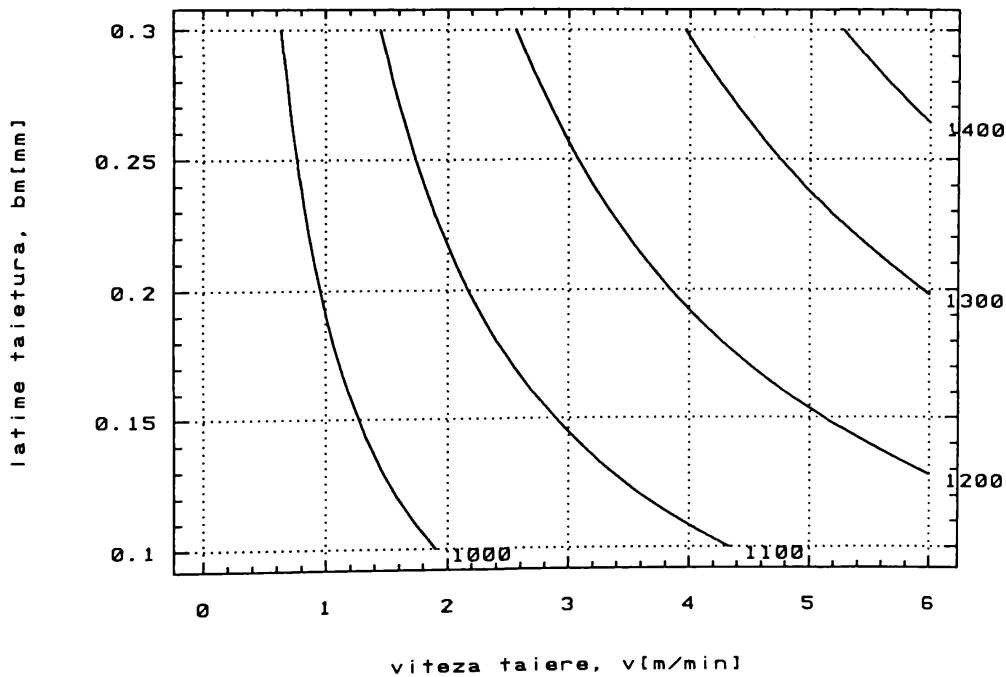


Fig.3.15

Trasarea curbelor din fig.3.15 si fig.3.16 s-a făcut presupunându-se valoarea  $\eta = 1$ . Cu ajutorul valorilor lui  $\eta$  determinate pentru fiecare condiție particulară pe baza anexei 1, se aduc corecțiile necesare, în tab.3.2 apărând comparativ valorile calculate si cele experimentale (vezi cap.4).

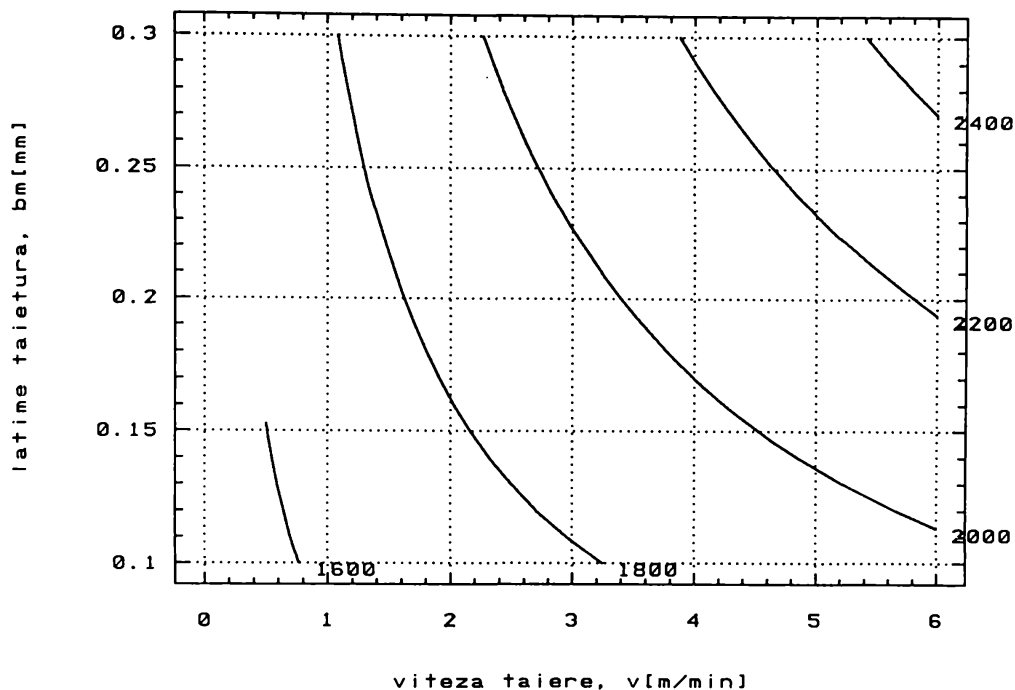


Fig.3.16

**Comparație între valorile calculate si cele experimentale**

Tabela 3.2

Nr. crt.	s [mm]	v [m/min]	$b_m$ [mm]	$\eta$ [-]	$P_l$ med. calcul [W]	Interval $P_l$ calcul [W]	$P_l$ experiment [W]
1.	1,7	3	0,21	0,99	1516	[1211 ; 1762]	1200
2.	1,7	1	0,33	0,82	1119	[ 928 ; 1305]	1200
3.	1,7	3	0,11	1,00	916	[ 761 ; 1070]	800
4.	1,7	1	0,21	0,94	676	[ 569 ; 774]	800
5.	1,0	3	0,31	0,87	1396	[1053 ; 1642]	1200
6.	1,0	1	0,38	0,50	1184	[ 981 ; 1395]	1200
7.	1,0	3	0,20	0,98	869	[ 700 ; 1035]	800
8.	1,0	1	0,27	0,75	613	[ 514 ; 712]	800

Se observă că atât valorile medii ale puterii laser calculate, cât mai ales intervalele de valori rezultate din calcul sunt suficient de apropiate de valorile experimentale astfel încât modelul analitic propus să poată fi utilizat pentru determinarea prin calcul a coordonatelor unor puncte în jurul cărora modelarea în vederea optimizării

tehnologiei de tăiere să se facă în continuare experimental; în conformitate cu cele precizate în cap.1 și cap.2, rezultă că prin aceasta, scopul modelării analitice a fost atins.

### 3.4.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere și grosimii materialului tăiat

Deoarece din punct de vedere tehnologic este util a se putea aproxima grosimea maximă de material ce poate fi tăiat în condiții date, precum și viteza maximă **FL-OP** care asigură, în condiții precizate, tăierea completă a materialului, și în cazul acestui procedeu de **TL** ele pot fi determinate analitic, pe baza unor ipoteze simplificatoare:

- **TL** are loc prin fenomenologia prezentată în paragraful 2.4.3. dar pierderile prin conducție termică se neglijează ( $P_{CT} = 0$ ), considerându-se că întreaga energie laser absorbită este utilizată pentru încălzirea materialului, topirea și vaporizarea acestuia:

- întreaga secțiune a **FL** este utilizată pentru încălzirea materialului ( $\eta = 1$ );

- aportul energetic al reacției exoterme de oxidare a materialului în realizarea echilibrului energetic este maxim, ceea ce presupune că în ecuația conservării energiei,  $H_{OX} \Rightarrow \max.$ , (adică se formează exclusiv  $Fe_3O_4$ );

- ținând cont de distribuția reală gaussiană a intensității pe secțiunea **FL**, orice îndepărtare de la axa tăieturii duce la scăderea drastică a energiei laser transferată materialului **OP**, deci și a temperaturii, care coboară sub  $T_V$ ; în aceste condiții, lățimea medie a tăieturii  $b_m$ , se consideră a fi egală cu diametrul **SL** pentru un **FL** ideal,  $2w_0$ .

Pe baza acestor ipoteze, și ținând seama de distribuția gaussiană a intensității **FL**, din ecuația conservării energiei (3.7), rezultă:

$$A \cdot P_L = \sqrt{\pi} \cdot w_0 \cdot \rho \cdot s \cdot v \cdot [C \cdot (T_V - T_0) + \lambda_T + \lambda_V - H_{OX \max}] \quad [W] \quad (3.35)$$

care este relația căutată.

Pentru reprezentarea grafică a fost ales **OL**, caracterizat prin valorile constantelor precizate în paragraful anterior, rezultând:

- fig.3.17, care prezintă forma suprafeței de răspuns  $v = f(s, P_L)$ , pentru un **FL** cu diametrul  $2w_0 = 0,2 \text{ mm}$ ;

- fig.3.18 si 3.19, care prezintă dependența  $v = f(s)$ , pentru diferite valori ale  $P_L$  și  $2w_0$ , obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns de tipul celei prezentate în fig.3.17 cu plane verticale.

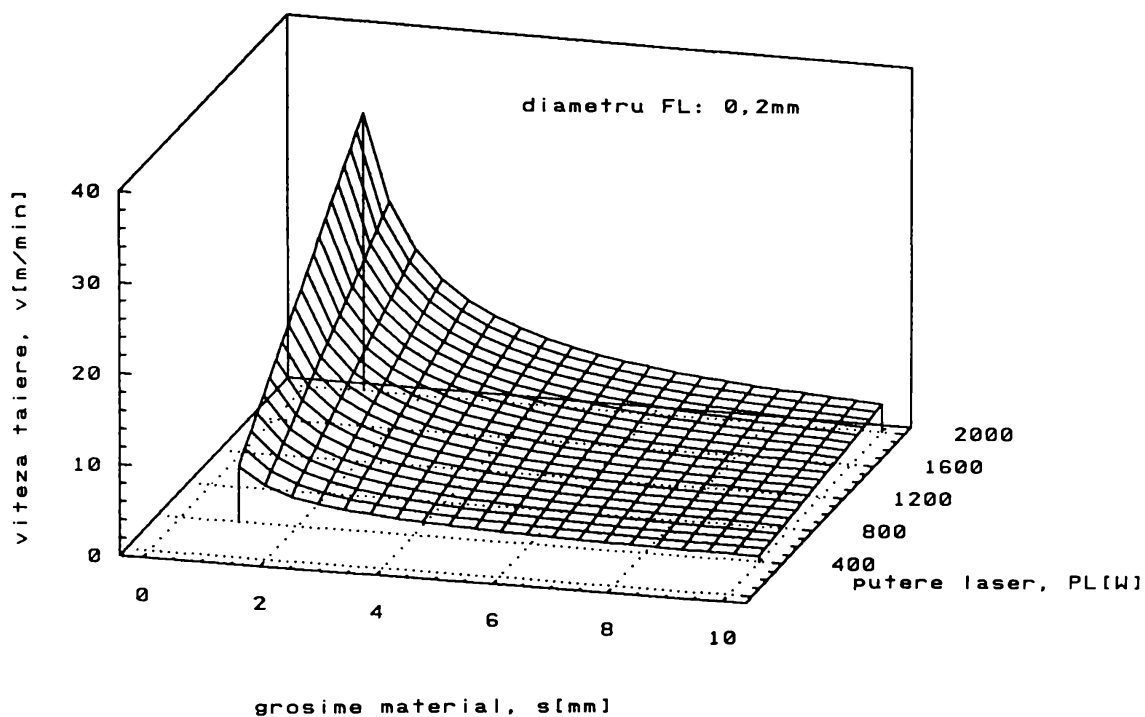


Fig.3.17

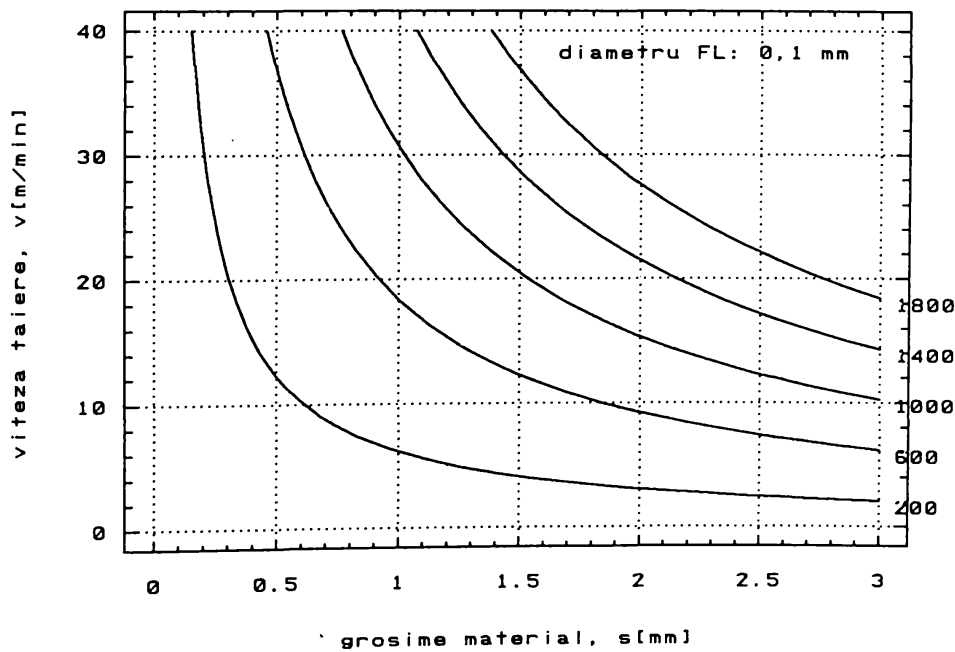


Fig.3.18

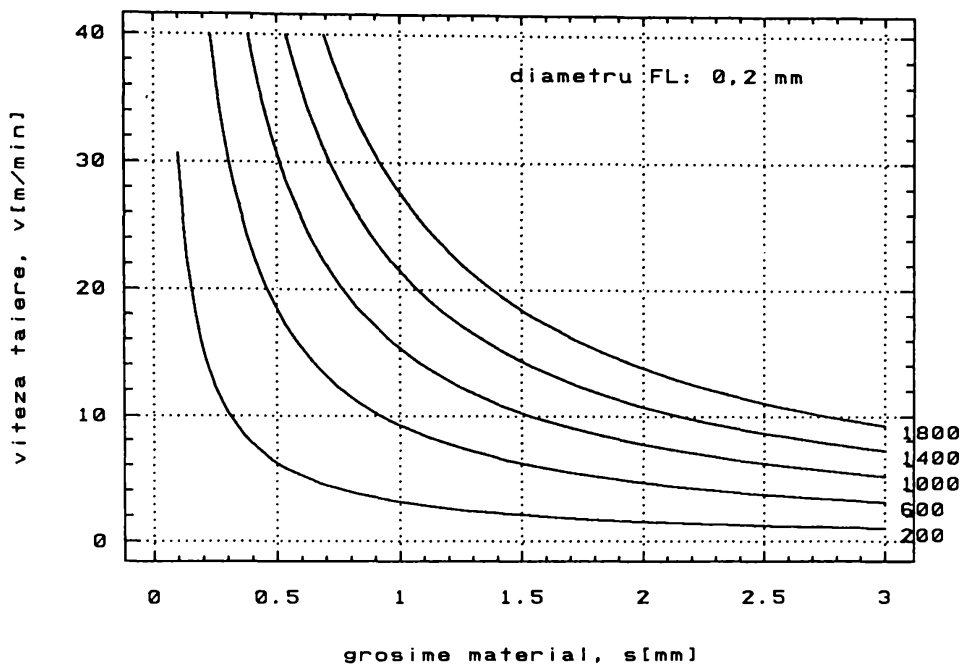


Fig.3.19

Pentru reprezentările grafice, valorile parametrilor  $v$ ,  $s$ ,  $P_l$  și  $w_0$  s-au ales în domeniul de interes practic la TL a OL. Curbele din fig.3.18 și fig.3.19 sunt de mare utilitate în aprecierea primară rapidă a valorilor limită ce pot fi atinse la TL a OL.

### 3.5. Model analitic al tăierii laser prin descompunere termochimică

#### 3.5.1. Stabilirea dependentei analitice între $b_m$ și parametrii $P_L$ , $s$ și $v$

Pe baza fenomenologiei descrisă în paragraful 2.4.4 precum și a ipotezelor din paragraful 3.2, poate fi obținută relația de dependență între lățimea medie a tăieturii,  $b_m$ , ca element al mulțimii  $\underline{T}$  și parametrii de interes tehnologic:

- $E_{I,6}$   $\Rightarrow$  puterea **FL**,  $P_L$  ;
- $S_{M2}$   $\Rightarrow$  grosimea **OP**,  $s$ ;
- $E_{LMG1}$   $\Rightarrow$  viteza de tăiere,  $v$ ,

ca elemente ale mulțimii  $\underline{FI}$ .

În plus față de ipotezele prezentate în paragraful 3.2, se presupune că:

- numai o parte din secțiunea transversală a **FL**, notată cu  $\eta$ , este utilizată la încălzirea materialului **OP**; determinarea fracțiunii  $\eta$  este detaliată în anexa 1;

- pierderile prin conducție termică sunt neglijabile, ca urmare a conductivității termice  $K$  și a difuzivității  $\kappa$  extrem de mici în cazul materialelor pentru a căror **TL** se aplică acest model (vezi tab. 2.4);

- în ecuația conservării energiei (3.7), apare un termen care include energia consumată pentru descompunerea termochimică a materialului **OP**.

Cu aceste ipoteze, termenii  $P_C$  și  $P_P$  din ecuația conservării energiei (3.7), dobândesc următoarea formă:

$$P_C = A \cdot \eta \cdot P_L \quad [\text{W}] \quad (3.36)$$

și

$$P_P = P_I + P_{DT} \quad [\text{W}] \quad (3.37)$$

în care:

$P_I$  [W]  $\Rightarrow$  debitul energetic necesar încălzirii **OP** până la temperatura de descompunere termochimică,  $T_{DT}$  ;

$P_{DT}$  [W]  $\Rightarrow$  debitul energetic necesar descompunerii termochimice a materialului **OP**.

Detaliind, cei doi termeni de mai sus se pot scrie sub forma:

$$P_l = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot C \cdot (T_{DT} - T_0) \quad [\text{W}] \quad (3.38)$$

si respectiv:

$$P_{DT} = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot H_{DT} \quad [\text{W}] \quad (3.39)$$

în care:

$H_{DT}$  [J/kg]  $\Rightarrow$  energia consumată pentru descompunerea unității de masă de material.

Înlocuind (3.36), (3.38) si (3.39) în (3.7), rezultă explicit legătura analitică între  $P_L$ ,  $v$ ,  $s$  si  $b_m$  pentru cazul TL prin descompunere termochimică:

$$A \cdot \eta \cdot P_L = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_{DT} - T_0) - H_{DT}] \quad [\text{W}] \quad (3.40)$$

Relația (3.40) poate fi utilizată pentru reprezentarea grafică a dependenței analitice amintită mai sus pentru orice material tăiat cu laser în condițiile precizate prin ipotezele care au condus la scrierea relației.

Ca material reprezentativ pentru acest procedeu de TL este ales **PMMA**, caracterizat (conform cap.2 si paragrafului 3.2) prin următoarele valori:

- $\rho = 1186 \text{ kg/m}^3$  ;
- $K = 0,2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ;
- $\kappa = 0,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- $T_{DT} = 623 \text{ K}$ ;
- $T_0 = 293 \text{ K}$ ;
- $C = 1,4 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ;
- $A = 0,8$ .

Pentru energia consumată pentru descompunerea unității de masă de material se acceptă valoarea  $H_{DT} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$  [47].

În vederea reprezentării grafice, se presupune că parametrii variabili  $P_L$  si  $v$  aparțin următoarelor intervale de interes practic:  $P_L \in [100, 500] \text{ W}$ ,  $v \in [0,5, 5] \text{ m/min}$ .

În aceste condiții, s-au trasat cu ajutorul programului STATGRAPHICS dependențele funcționale  $b_m = f(P_L, v)$ , pentru diferite grosimi  $s$  ale **OP**, prezentate în fig. 3.20...fig.3.22:

- fig. 3.20: suprafața de răspuns  $b_m = f(P_L, v)$ , pentru  $s = 5 \text{ mm}$ , în scopul



evidențierii formei acestei suprafețe, formă păstrată și pentru celelalte grosimi  $s$ ;

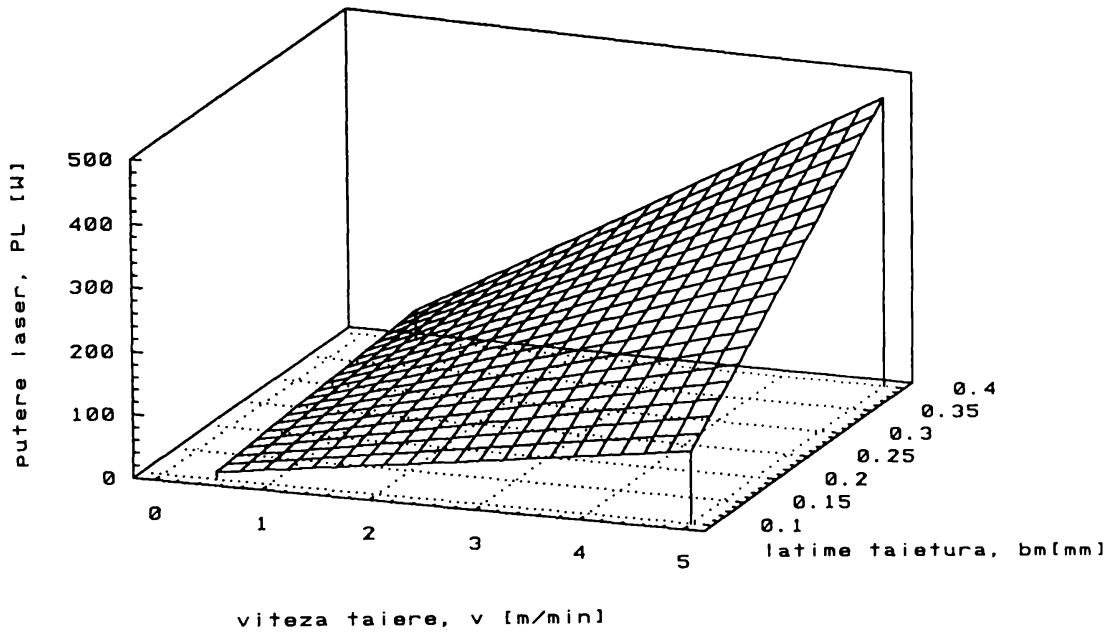


fig.3.20

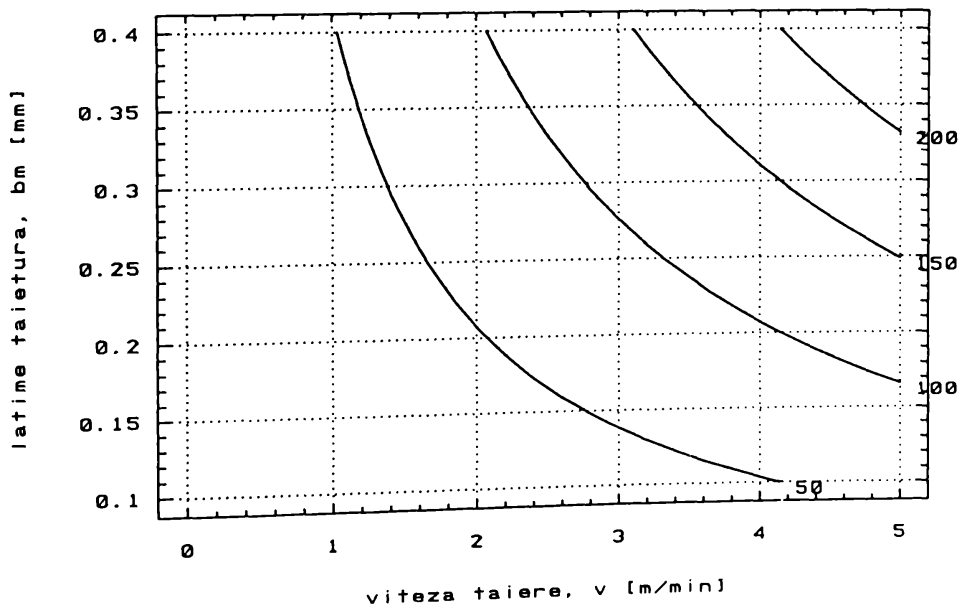


fig.3.21

- fig.3.21 și fig.3.22: curbele de nivel constant, obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale; aceste curbe permit identificarea lățimii medii a tăieturii,  $b_m$ , atunci când se cunosc puterea FL,  $P_L$ , viteza de tăiere,  $v$ , și

grosimea OP,  $s$ ; pentru compararea valorilor determinate analitic cu cele măsurate, grosimea OP a fost aleasă:  $s = 2,6$  mm (fig.3.21) și  $s = 5$  mm (fig.3.22).

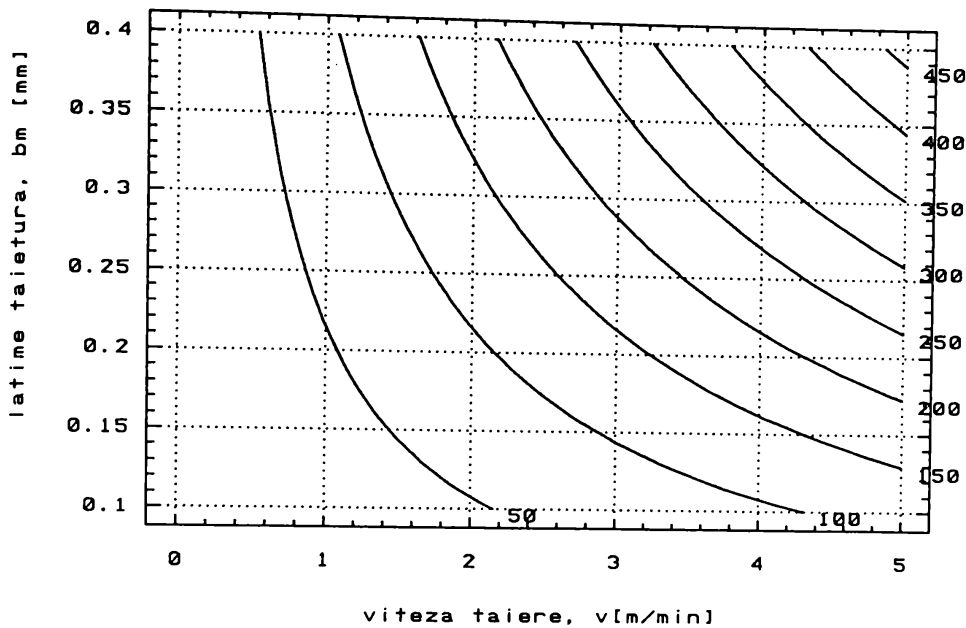


fig.3.22

**Comparație între valorile calculate și cele experimentale**

Tabela 3.3

Nr. crt.	$s$ [mm]	$v$ [m/min]	$b_m$ [mm]	$\eta$ [-]	$P_L$ [W] calcul	$P_L$ [W] experiment
1.	5,0	3	0,21	0,36	406	400
2.	5,0	1	0,33	0,22	348	400
3.	5,0	3	0,11	0,38	201	200
4.	5,0	1	0,21	0,26	187	200
5.	2,6	3	0,31	0,33	341	400
6.	2,6	1	0,38	0,19	241	400
7.	2,6	3	0,20	0,37	196	200
8.	2,6	1	0,27	0,23	142	200

Trasarea curbelor din fig.3.21 și fig.3.22 s-a făcut presupunându-se valoarea  $\eta = 1$ . Cu ajutorul valorilor lui  $\eta$  determinate pentru fiecare condiție particulară pe baza anexei 1, se aduc corecțiile necesare, în tab.3.3. apărând comparativ valorile calculate și cele experimentale (vezi cap.4).

Se observă o apropiere mulțumitoare între valorile măsurate și cele calculate, astfel încât, chiar dacă curbele din fig.3.21 și fig.3.22 nu pot fi utilizate direct în

evaluarea parametrilor tehnologici ai TL prin acest procedeu în vederea optimizării, ele pot furniza puncte centrale ale unor experimente pe baza cărora să se obțină modele empirice mult mai fidele, destinate optimizării tehnologiei TL. Conform celor precizate în cap.1 și cap.2, rezultă că scopul modelării analitice a TL prin acest procedeu a fost atins.

### 3.5.2. Calculul valorilor maxime ale vitezei de tăiere și grosimii materialului tăiat

Ca și în cazul TL a OL, pe baza unor ipoteze simple, se pot aproxima și în cazul acestui procedeu de TL, grosimea maximă de material ce poate fi tăiat în condiții date, respectiv viteza maximă FL-OP care asigură tăierea completă a OP:

- întreaga secțiune a FL este utilizată pentru încălzirea materialului ( $\eta = 1$ );
- ținând cont de distribuția reală gaussiană a intensității pe secțiunea FL, orice îndepărtare de la axa tăieturii duce la scăderea drastică a energiei laser transferată materialului OP, deci și a temperaturii, care coboară sub  $T_{DT}$ ; în aceste condiții, lățimea medie a tăieturii  $b_m$ , se consideră a fi egală cu diametrul SL pentru un FL ideal,  $2w_0$ .

Pe baza acestor ipoteze, și ținând seama de distribuția gaussiană a intensității FL, din ecuația conservării energiei (3.7), rezultă:

$$A \cdot P_L = \sqrt{\pi} \cdot w_0 \cdot \rho \cdot s \cdot v \cdot [C \cdot (T_{DT} - T_0) + H_{DT}] \quad [\text{W}] \quad (3.41)$$

Din relația (3.41) rezultă că grosimea maximă a materialului ce poate fi tăiat este proporțională cu raportul  $P_L / v \cdot w_0$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ], care reprezintă energia primită de unitatea de suprafață a FE.

Pentru reprezentarea grafică a relației (3.41) a fost ales tot PMMA, caracterizat prin valorile constantelor precizate în paragraful anterior, rezultând:

- fig.3.23, care prezintă forma suprafeței de răspuns  $v = f(s, P_L)$ , pentru un FL cu diametrul  $2w_0 = 0,2$  mm;

- fig.3.24 care prezintă dependența  $v = f(s)$ , pentru diferite valori ale  $P_L$ , obținută prin secționarea cu plane verticale a suprafeței de răspuns prezentată în fig.3.23.

Valorile parametrilor  $v$ ,  $s$ ,  $P_L$  și  $w_0$  s-au ales în domeniul de interes practic la TL a PMMA. Curbele din fig.3.24 sunt de mare utilitate în aprecierea primară rapidă a valorilor limită ce pot fi atinse la TL a PMMA.

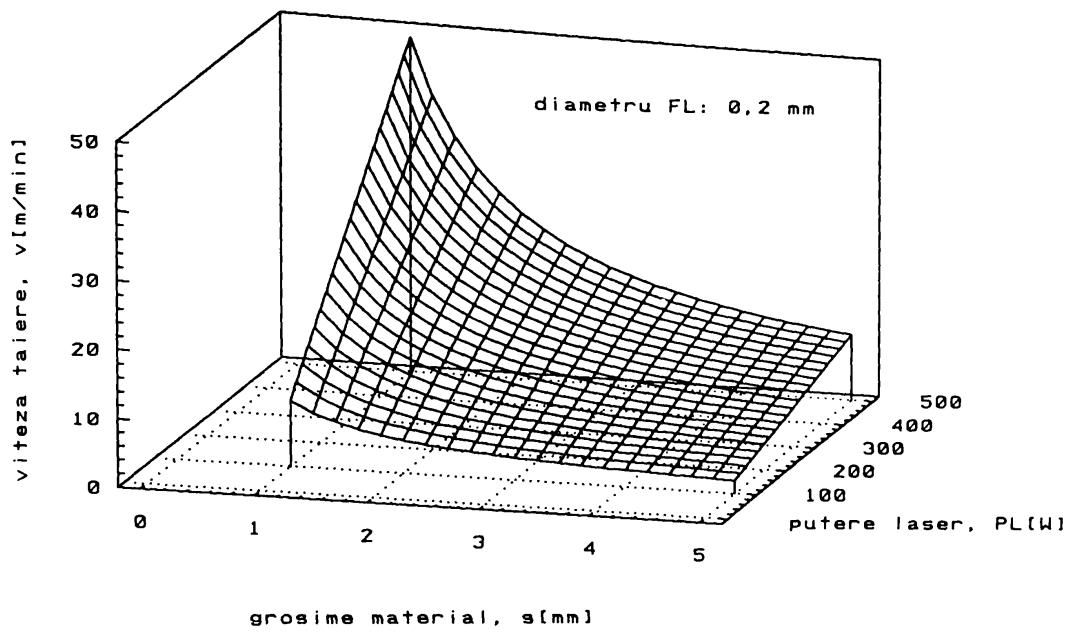


fig.3.23

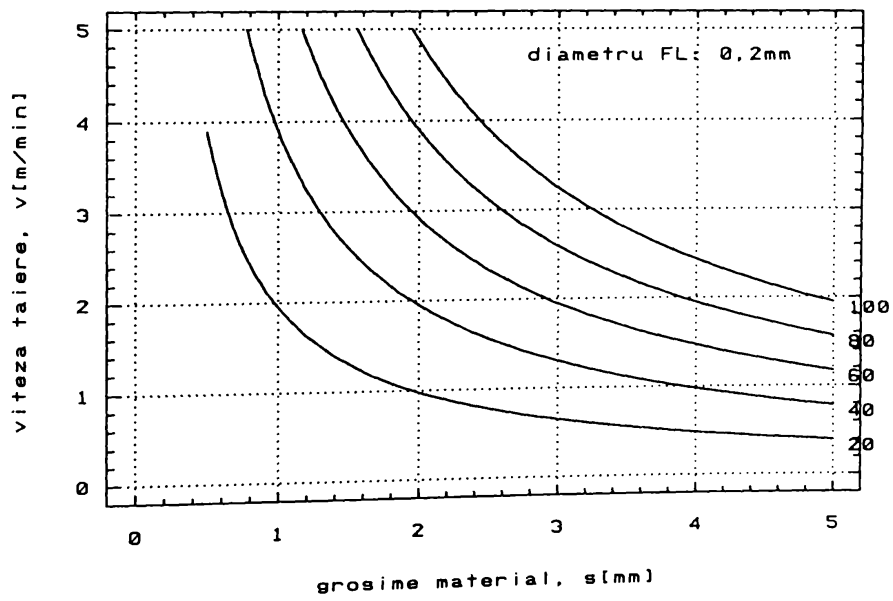


fig.3.24

### 3.6. Model analitic general de stabilire a dependenței între $b_m$ și parametrii $P_L$ , $s$ și $v$

Ipotezele inițiale, precum și felul în care au fost particularizați termenii din ecuația de echilibru energetic în zona **FE**, oferă posibilitatea scrierii unui model analitic general valabil pentru cazul celor trei procedee de **TL** analizate. Acest model permite stabilirea dependenței funcționale între elementul  $b_m$ , aparținând mulțimii **T** și parametrii  $P_L$ ,  $s$  și  $v$ , aparținând mulțimii **FI**.

Pornind de la ecuația (3.7), termenii  $P_C$  și  $P_L$  dobândesc următoarea formă:

$$P_C = A \cdot \eta \cdot P_L + P_{OX} \quad [\text{W}] \quad (3.42)$$

și respectiv:

$$P_P = P_I + P_{CT} + P_{DT} \quad [\text{W}] \quad (3.43)$$

în care toți termenii au fost definiți anterior.

Prin înlocuirea termenilor  $P_{OX}$ ,  $P_I$ ,  $P_{CT}$  și  $P_{DT}$  cu expresiile (3.32), (3.33), (3.14) și respectiv (3.39), rezultă ecuația:

$$A \cdot \eta \cdot P_L = b_m \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot [C \cdot (T_{CR} - T_0) + H_L + H_{DT} - H_{OX}] + \\ + 2\pi \cdot s \cdot K \cdot (T_T - T_0) \frac{\exp\left(-\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)}{K_0\left(\frac{v \cdot b_m}{4\kappa}\right)} \quad [\text{W}] \quad (3.44)$$

în care:

$T_{CR}$  [K]  $\Rightarrow$  temperatura critică  $\Rightarrow$  temperatura la care are loc prelevarea de material pe **FE**;

$H_L$  [J/kg]  $\Rightarrow$  energia necesară schimbării stării de agregare a materialului **OP**, de la  $T_0$  la  $T_{CR}$ ;

ceilalți termeni au fost definiți anterior.

Relația (3.44) reprezintă legătura analitică între  $b_m$  și parametrii  $P_L$ ,  $s$  și  $v$ , valabilă pentru toate cele trei procedee de **TL** modelate în acest capitol.

Prin particularizarea relației (3.44) pe baza fenomenologiei **TL** specifică procedeului, se poate regăsi fiecare dintre relațiile (3.14), (3.34) și (3.40), după cum urmează:

- **TL** prin topire si vaporizare limitată, cu suflarea unui gaz de lucru neutru:

$$T_{CR} = T_m ;$$

$$H_L = \lambda_T ;$$

$$H_{DT} = 0 ;$$

$$H_{OX} = 0 ;$$

- **TL** prin ardere, topire si vaporizare, cu suflarea unui gaz de lucru reactiv:

$$T_{CR} = T_V ;$$

$$H_L = \lambda_T + \lambda_V ;$$

$$H_{DT} = 0 ;$$

- **TL** prin degradare termochimică:

$$T_{CR} = T_{DT} ;$$

$$H_L = 0 ;$$

$$H_{OX} = 0 ;$$

$P_{CT} = 0 \Rightarrow$  pierderile prin conducție termică sunt neglijabile, datorită valorilor foarte mici ale mărimilor  $K$  și  $\kappa$  (tab.2.4).

Ecuția (3.44) poate fi utilizată pentru găsirea suprafețelor de răspuns de tipul celor prezentate în fig.3.1, fig.3.14 și fig.3.20 sau a curbelor de nivel constant obținute prin secționarea acestor suprafețe cu plane având diferite orientări.

S-a reușit astfel ca, pornind de la mecanismul fizic de formare a **FE** la **TL** a materialelor, precum și de la o privire unitară asupra **FI**, **FO** și ecuației de conservarea energiei pe **FE** (vezi paragrafele 3.1 și 3.2), să se găsească o relație relativ simplă care să permită găsirea valorilor uneia dintre mărimile  $h_m$ ,  $P_L$ ,  $s$  sau  $v$ , în condițiile stabilirii valorilor sau intervalelor de valori pentru celelalte trei. Pentru performanțe superioare, în jurul punctului de coordonate  $(h_m, P_L, s, v)$  se poate realiza o modelare experimentală, rezultând un model care să poată fi efectiv utilizat în scopul optimizării tehnologiei **TL**.

### 3.7. Concluzii

Cele prezentate în paragrafele acestui capitol, permit formularea următoarelor concluzii:

a) definirea **FI** poate fi făcută într-un mod general valabil pentru toate procedeele de **TL** a materialelor, astfel încât particularizarea lor să fie echivalentă cu formularea ipotezelor inițiale ale oricărei probleme de modelare;

b) fixarea **FO** și a fenomenologiei de formare a **FE** permite identificarea ecuațiilor fundamentale utilizate la obținerea modelelor analitice ale **TL**;

c) pornind de la ecuația conservării energiei pe **FE**, poate fi găsită pentru toate cele trei procedee de **TL** analiza dependența între mărimile  $b_m$ ,  $P_L$ ,  $s$  și  $v$ , și pot fi trasate grafic suprafețele de răspuns și curbele de nivel constant corespunzătoare;

d) modelele analitice astfel explicitate permit estimarea cu o bună aproximație a uneia dintre mărimile  $b_m$ ,  $P_L$ ,  $s$  sau  $v$ , când se cunosc celelalte trei;

e) pe baza unor ipoteze relativ simple, pornind de la ecuația conservării energiei, poate fi determinată, în condiții date, viteza maximă de tăiere sau grosimea maximă a **OP** ce poate fi tăiat prin procedeele analizate;

f) pornind de la ecuația conservării masei și respectiv de la ecuațiile de mișcare ale stratului de material topit de pe **FE**, poate fi determinată grosimea acestui strat, considerat element fundamental în formarea striatiunilor de pe pereții tăieturilor;

g) datorită modului unitar de definire a problemelor de modelare analitică a **TL** prin diferite procedee, poate fi elaborat un model analitic general de stabilire a dependențelor între mărimile  $b_m$ ,  $P_L$ ,  $s$  și  $v$ ;

h) rezultatele obținute în modelarea analitică pot constitui puncte de plecare pentru modelarea experimentală a **TL CO<sub>2</sub> cw**.

## CAPITOLUL 4

### MODELAREA EXPERIMENTALA IN VEDEREA OPTIMIZARII TAIERII MATERIALELOR CU FASCICULE LASER CO<sub>2</sub> cw

#### 4.1. Obiectul si metodica modelării experimentale

Din capitolele anterioare a rezultat faptul că TL este un procedeu tehnologic influențat de numeroși factori, care prezintă interacțiuni complexe, motiv pentru care o optimizare a tehnologiei TL exclusiv pe cale analitică este practic imposibilă, iar una pe cale exclusiv experimentală, extrem de costisitoare și greu de realizat. Din acest motiv, am considerat că cea mai rațională cale de urmat este aceea de a elabora modele analitice relativ simple, pentru a fi ușor de utilizat, dar suficient de fidele pentru ca datele furnizate de ele să fie utilizate la elaborarea modelării experimentale, în urma căreia să poată fi luate decizii privind optimizarea tehnologiei de TL.

Modelele analitice explicate în cap.3 furnizează legătura între trei elemente importante ale mulțimii **FI** ( $s$ ,  $v$  și  $P_L$ ) și lățimea medie a tăieturii,  $b_m$ , ca element al mulțimii **FO**. De aceea, pentru ca rezultatele modelării analitice să poată fi efectiv utilizate în modelarea experimentală, este necesar ca **FO** ce urmează a fi explicate în continuare să îndeplinească cel puțin următoarele două condiții:

- să poată fi exprimate cantitativ;
- să depindă explicit de lățimea tăieturii.

În plus, este evident că ele trebuie să aibe o semnificație fizică clară și să prezinte interes tehnologic.

În acest context, realizarea experimentelor prezentate în acest capitol urmărește două obiective majore:

- obținerea unor modele experimentale cât mai fidele, astfel încât estimările făcute cu ajutorul lor să poată fi folosite în scopuri tehnologice, în particular la



optimizarea tehnologiei **TL**;

- obținerea unor valori experimentale care să permită compararea lor cu valorile estimate cu ajutorul modelelor analitice prezentate în cap.3, în scopul verificării adecvănței acestor modele.

Deoarece atingerea primului obiectiv include și realizarea celui de-al doilea, am considerat că structura experimentală cea mai rațională și eficientă pentru obținerea modelelor experimentale ale **TL** în domeniul abordat în teza de doctorat, este următoarea:

- pe baza unor experimente de premodelare, pentru fiecare material ce urmează a fi analizat, să se realizeze ierarhizarea **FI** în ordinea importanței influenței lor asupra **FO**;

- pentru **FI** rezultați de primă importanță, identificarea pe bază experimentală a ecuațiilor de regresie pentru **FO** definite;

- alegerea, pe baza modelelor experimentale găsite, a domeniilor sau valorilor **FI** care asigură optimizarea **FO** în condițiile precizării unui criteriu de optimalitate.

Determinările experimentale sunt făcute în condițiile în care se acceptă că mărimile ce intervin ca **FI** asupra diferitelor elemente ale mulțimii **FO**, sunt și altele în afara parametrilor  $s$ ,  $v$  și  $P_L$ ; de asemenea, este valorificată experiența acumulată prin cercetările efectuate în Laboratorul de Laseri al Catedrei Tehnologie Mecanică [2],[37],[38],[41],[81],[89],[96] în special pentru stabilirea domeniilor de interes tehnologic ale diferiților **FI** la **TL** a materialelor.

Ca materiale ale **OP** au fost alese, din motive prezentate în capitolele anterioare:

- **OL** ca material tipic pentru procedeul de **TL** prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru ( $N_2$ ), respectiv pentru procedeul de **TL** prin oxidare, topire și vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv ( $O_2$ );

- **PMMA** ca material tipic pentru procedeul de **TL** prin descompunere termochimică;

Ca experiment preliminar modelării a fost ales bilanțul aleator, datorită puterii sale de rezoluție și obiectivității rezultatelor furnizate [84].

Pentru obținerea modelelor experimentale a fost ales experimentul factorial complet de ordinul I [84], ținându-se cont de forma particulară a dependenței

analitice între **FI** și **FO** (vezi cap.3).

Din motive de coerență a expunerii ideilor din cap.3, compararea rezultatelor estimate cu ajutorul modelelor analitice cu cele măsurate ca urmare a efectuării experimentelor 1...4, s-a realizat pe baza tab.3.1, tab.3.2 și tab.3.3, obținându-se diferențe suficient de mici pentru a concluziona că aceste modele pot fi utilizate în continuare, pe baza algoritmului prezentat în capitolul 5, la furnizarea informațiilor preliminare modelării experimentale, cu precădere la indicarea valorilor celor mai convenabile ale **FO**, în jurul cărora să se inițieze modelarea experimentală.

Toate experimentele prezentate în acest capitol au fost realizate la CALFA (Centre d'Application des Lasers de Flandre-Artois) Béthune, Franța, în perioada aprilie-mai 1994, cu acordul părții franceze.

Măsurările și prelucrarea rezultatelor experimentale au fost realizate parțial la CALFA și parțial în Laboratorul de Laseri al Catedrei Tehnologie Mecanică.

## 4.2. Utilajul de experimentare

### 4.2.1. Structura utilajului

Pornind de la structura-bloc a utilajelor utilizate la prelucrarea prin eroziune cu FL [85], în continuare vor fi prezentate următoarele blocuri funcționale ale instalației CILAS 2000 [128], cu ajutorul căreia au fost realizate programele experimentale proiectate în scopul modelării empirice a TL:

- blocul optic, ce are ca obiectiv generarea, transmiterea și poziționarea pe suprafața OP a FL de parametri adecvați prelucrării;

- blocul mecanic, necesar susținerii și consolidării dispozitivelor și blocurilor componente ale utilajului și respectiv poziționării, fixării și deplasării relative FL-OP;

- blocul de deservire energetică și substanțială a tuturor unităților funcționale ale utilajului de prelucrare;

- blocul de comandă, care asigură programarea, cuplarea, sincronizarea și controlul funcționării utilajului, în ansamblu și pe blocuri componente.

O imagine de ansamblu a utilajului apare în fig.4.1

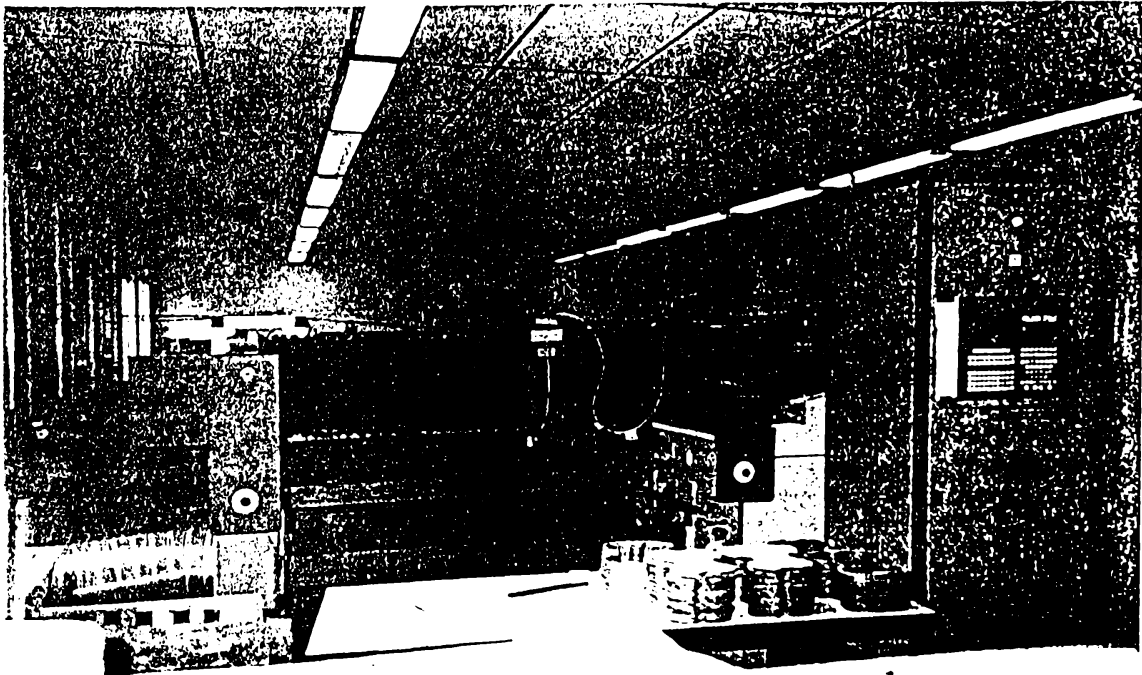


Fig.4.1

#### 4.2.2. Blocul optic

Mediul laser este un amestec de înaltă puritate de He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, în proporții volumice de 74/20/6 %, care permite obținerea unui FL având următoarele caracteristici:

- $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ;
- TEM<sub>00</sub> (predominant);
- putere maximă de ieșire,  $P_{max} = 2000 \text{ W}$ ;
- putere de ieșire nominală,  $P = 1500 \text{ W}$ ;
- stabilitatea puterii,  $\Delta P < 3 \%$ ;
- diametrul la ieșirea din sursă,  $2w_{iR} \leq 16 \text{ mm}$ ;
- diametrul la  $z = 6 \text{ m}$ ,  $2w_R \leq 25 \text{ mm}$ ;
- divergența,  $2\theta_R \leq 2 \text{ mrad}$ ;
- polarizare: circulară.

O imagine a sursei laser din care rezultă și poziționarea ei în cadrul utilajului, apare în fig.4.2.

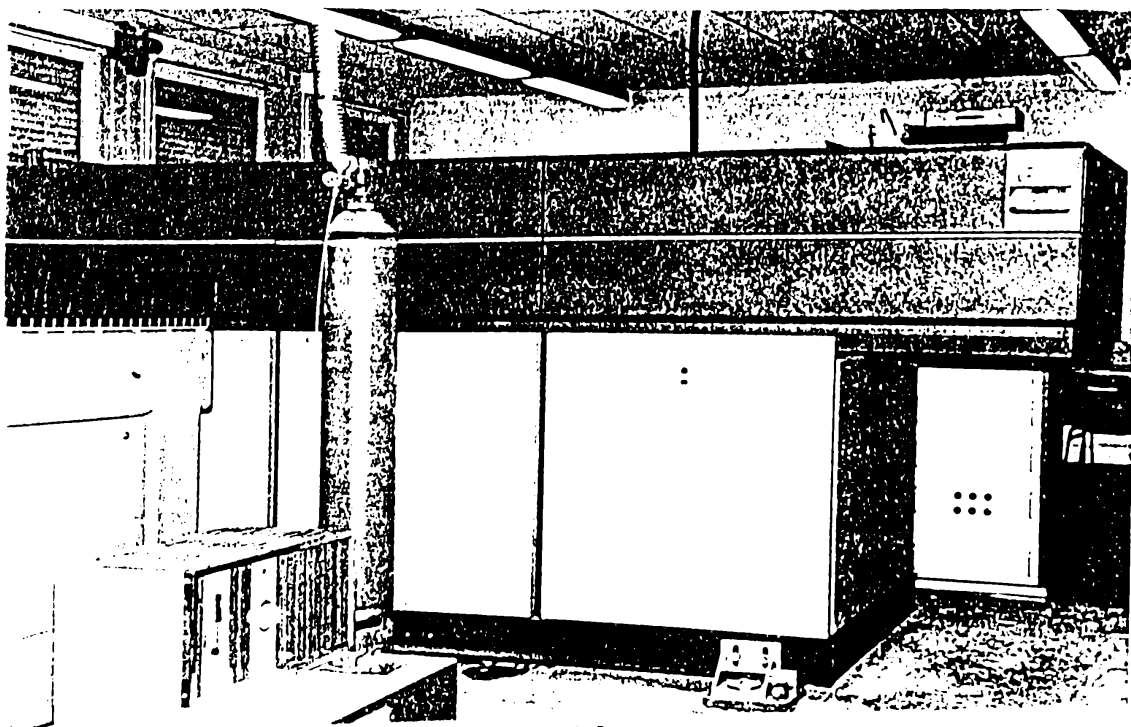


Fig.4.2

Sursa laser prezintă următoarele elemente caracteristice:

- funcționarea este asigurată corespunzător la temperaturi  $T \in [10...35]$  °C și coeficienți de umiditate relativă de max. 70%.

- puterea de ieșire a **FL** poate fi modificată prin variația comandată a intensității curentului descărcării de înaltă tensiune dintre anozii și catodii sursei;
- catodii, anozii și oglinzile de capăt sunt răcite cu ajutorul unui circuit de apă;
- oglinda total reflectătoare poate fi echipată opțional cu un sistem de polarizare liniară a **FL**.

Traseul optic al **FL** de la ieșirea din sursă și până la poziționarea lui perpendicular pe suprafața mesei de lucru este realizat cu ajutorul a trei oglinzi mobile poziționate ca în schema de principiu din fig.4.3.

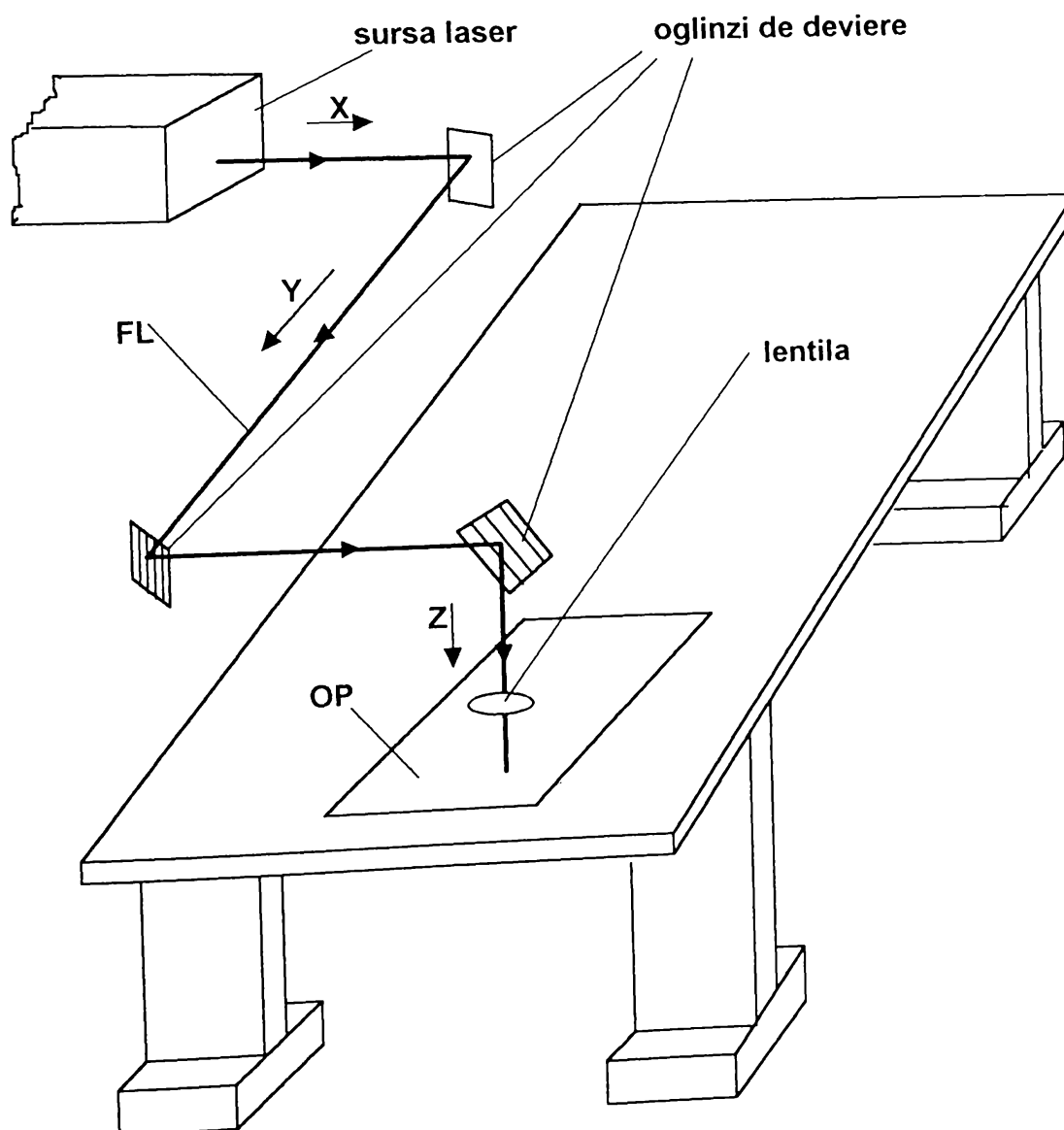


Fig.4.3

Concentrarea FL este realizată cu ajutorul unei lentile plan-convexe din CdTe, având distanța focală  $f = 127 \text{ mm}$ , montată într-un cap de lucru (fig.4.4), a cărui construcție este similară cu cea prezentată în schema de principiu din fig.4.5. Diametrul SL este  $2w_{OR} \cong 0,2 \text{ mm}$ .

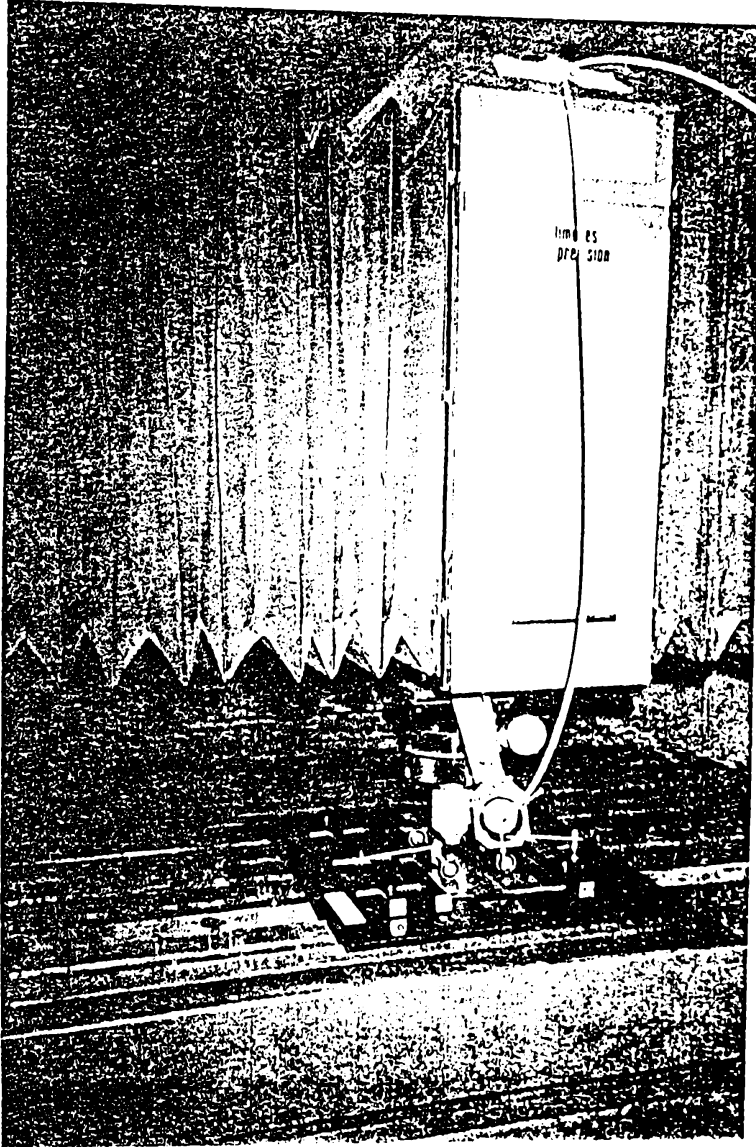


Fig.4.4

Atât oglinzile cât și lentila sunt răcite cu ajutorul unui circuit de apă și sunt suflăte cu aer uscat și filtrat pentru a împiedica depunerea pe suprafața lor de impurități care să le modifice caracteristicile optice.

Deoarece FL  $\text{CO}_2$  nu este vizibil, coaxial cu acesta este transmis un FL He-Ne ( $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$ ), având o putere de 2 mW, în scopul evidențierii zonei de impact dintre FL  $\text{CO}_2$  și OP.

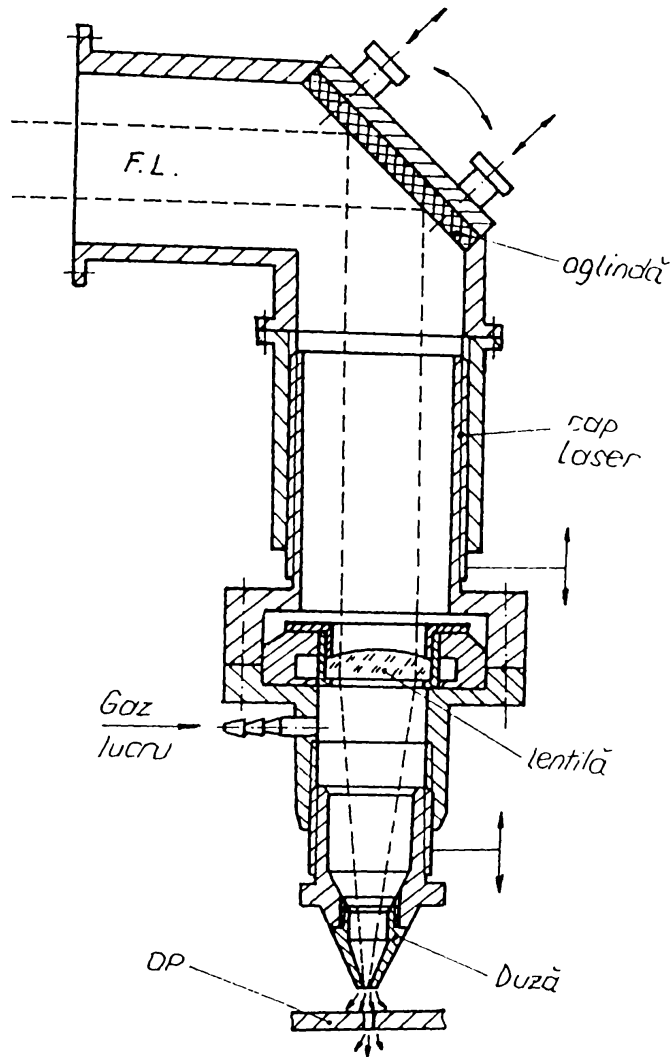


Fig.4.5

#### 4.2.3. Blocul mecanic

Este alcătuit pe de o parte dintr-un batiu paralelipipedic (fig.4.2), cu rol de susținere a sursei laser și de înglobare a instalațiilor de răcire și de ventilație ale acesteia, având următoarele caracteristici:

- dimensiuni de gabarit: 4180x1300x1650 mm;
- lungimea la sol: 2800 mm;
- masa: 2700 kg,

și pe de altă parte dintr-un echipament ce asigură realizarea mișcării relative FL-OP după trei axe perpendiculare (fig.4.3 și fig.4.6), precum și poziționarea OP în vederea prelucrării (fig.4.6).



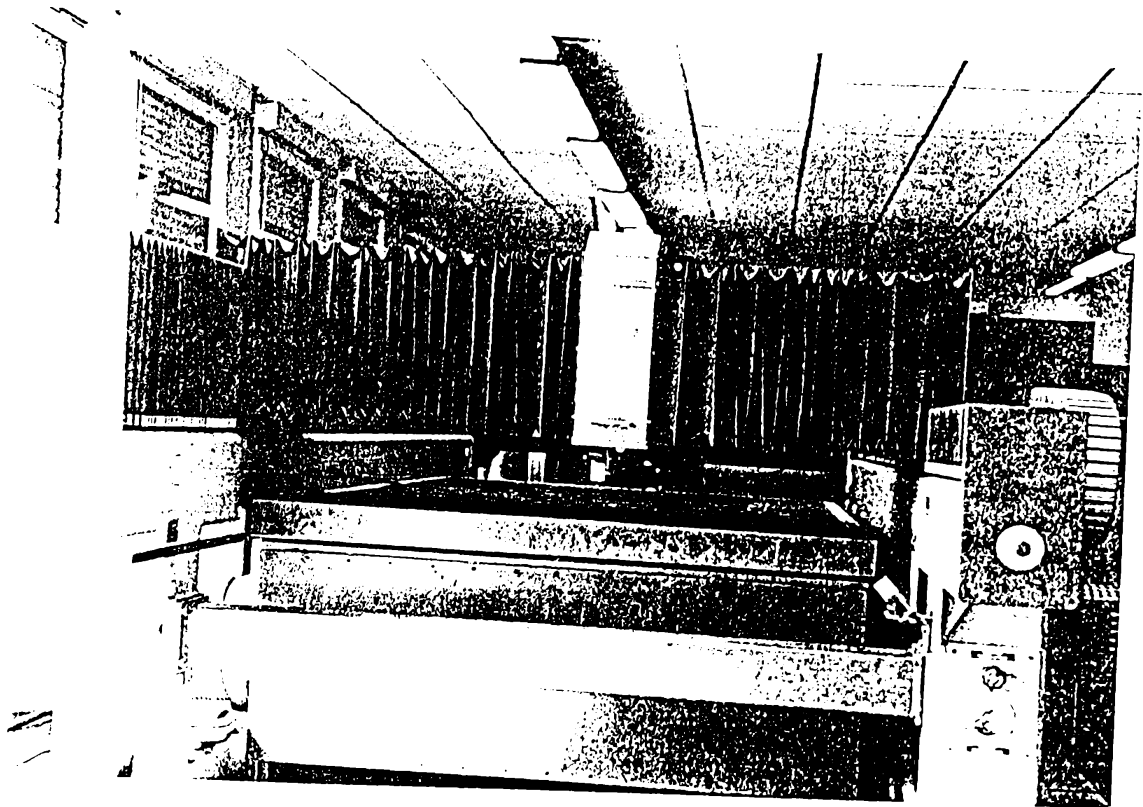


Fig.4.6

Echipamentul care asigură deplasarea relativă FL-OP prezintă următoarele caracteristici:

- cursa:
  - transversală (**x**): 1500 mm
  - longitudinală (**y**): 2500 mm;
  - verticală (**z**): 90 mm;
- viteza maximă:
  - transversală: 45 m/min;
  - longitudinală: 45 m/min;
  - verticală: 1 m/min;
- accelerația maximă: 8 m/s<sup>2</sup>;
- gabarit: 4600x1850x1670 mm.

Acționarea după cele trei axe se realizează cu motoare de curent continuu, iar transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație este realizată cu ajutorul mecanismelor :

- șurub (cu bile) - piuliță pentru axele **x** și **z**;
- pinion - cremalieră pentru axa **y**.



Ghidarea mișcării este realizată cu ajutorul unor ghidaje cilindrice cu bile iar structura de rezistență este realizată din profile tubulare pătrate cu latura de 250 mm.

Poziționarea **OP** se face prin așezarea pe o masă cu dimensiunile 1500x2500 mm (fig.4.6).

În cazul prelucrării **OP** metalice, menținerea constantă a distanței între suprafața frontală a capului de lucru și **OP** se realizează cu ajutorul unui sistem capacitiv montat pe capul de lucru.

#### 4.2.4. Blocul de deservire energetică și substanțială

Inclde următoarele componente:

a) sursa de alimentare cu energie electrică, cu următoarele caracteristici:

- tensiune alimentare: 380 V;
- putere instalată: 50 KVA;
- putere maximă consumată: 33 KW;

b) echipamentul de alimentare cu mediu activ gazos laser, cu următoarele caracteristici:

- natură gaz: 74 % He, 20 % N<sub>2</sub>, 6 % CO<sub>2</sub>;
- presiune amestec: 2...10 bar;
- stabilitate: ±10 %;
- consum: 140 l/h (amestec);

c) sistemul de răcire cu apă, cu următoarele caracteristici:

- presiune intrare: 2,2...3 bar;
- debit: 2000 l/h;
- temperatura de intrare: 10...20 °C;

d) echipamentul de alimentare cu aer comprimat, cu următoarele caracteristici:

- presiune de intrare: 6 bar;
- debit: 4 m<sup>3</sup>/h;

f) instalația de filtrare și uscare a aerului:

g) echipamentul de alimentare cu gaz de lucru (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar); permite măsurarea valorii presiunii cu ajutorul unui manometru.

#### 4.2.5. Blocul de comandă

Cuprinde dulapul de comandă al sursei laser și al blocului de deservire energetică și substanțială, precum și comanda numerică a deplasării relative FL-OP (fig.4.7):

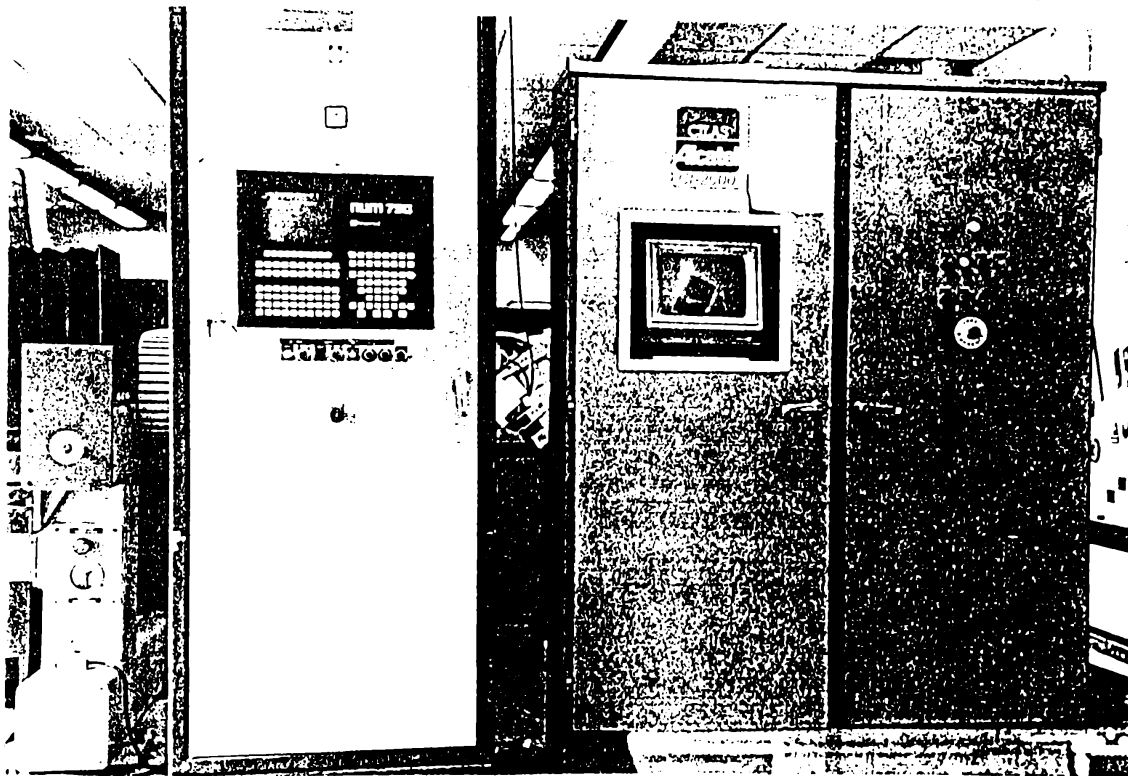


Fig.4.7

a) dulapul de comandă permite punerea în funcțiune sau oprirea utilajului; el înglobează un calculator care comandă reglarea parametrilor utilajului și asigură controlul echipamentelor și instalațiilor de deservire energetică și substanțială; afișarea parametrilor precum și a eventualelor defecțiuni se face pe ecranul monitorului cu care este echipat calculatorul;

b) comanda numerică este de tip NUM 750 [130] și permite programarea conturilor ce urmează a fi descrise de către FL, precum și fixarea parametrilor viteză  $v$  și putere laser  $P_L$ .

Pentru obținerea unor performanțe tehnologice corespunzătoare este necesar a fi verificate sau realizate următoarele reglaje:

- reglajul coliniarității FL CO<sub>2</sub> cu FL He-Ne;
- reglajul orientării oglinzilor de deviere;
- centrarea capului de lucru în raport cu FL;
- determinarea poziției SL.

## 4.3 Ierarhizarea prin bilanț aleator a factorilor de influență

### 4.3.1. Metoda bilanțului aleator

Datorită numărului mare de **FI** ce se pot identifica la **TL** a materialelor (vezi paragraful 3.1), păstrarea tuturor acestora în modelarea experimentală implică o mărire nejustificată a volumului experimentelor și aceasta deoarece nu toți **FI** prezintă aceeași importanță. Din acest motiv, este utilă efectuarea unor experimente preliminare celor de modelare, care să permită clasificarea în ordinea importanței a **FI** pentru **FO** definite, urmând ca, ulterior, în experimentele de modelare să fie păstrați numai o parte a acestor **FI** și anume cei rezultați mai importanți.

Între experimentele preliminare modelării experimentale, metoda bilanțului aleator este cea mai preferată datorită puterii sale de rezoluție și obiectivității aprecierilor [68],[77],[84].

Metoda presupune parcurgerea următoarelor etape [84]:

- a) definirea **FO**;
- b) identificarea **FI** și stabilirea numărului și valorilor nivelelor de reglare ale acestor factori;
- c) precizarea caracteristicilor utilajului pe care urmează să se efectueze încercările;
- d) stabilirea volumului experimentului ca multiplu al celui mai mic multiplu comun al nivelelor **FI**;
- e) alcătuirea matricilor-program prin distribuția aleatoare a nivelelor **FI**: fiecare nivel al unui anumit **FI** este necesar să apară în matrice de același număr de ori ca și celelalte nivele ale aceluia **FI**;
- f) efectuarea încercărilor și măsurarea valorilor **FO**;
- g) prelucrarea rezultatelor experimentale prin eliminarea succesivă a **FI** în ordinea descrescătoare a importanței lor, rezultând după fiecare eliminare un nou experiment de bilanț aleator, având însă cu un **FI** (cel eliminat ultimul) mai puțin, precum și altă coloană de valori (corectate prin calcul) ale **FO**;
- h) prezentarea concluziilor finale ale experimentului.

## 4.3.2. Ierarhizarea factorilor de influență la tăierea laser a PMMA. (Experimentul 1)

### 4.3.2.1 Proiectarea și realizarea experimentului

Scopul experimentului este de a ierarhiza **FI** identificați mai jos în ordinea importanței influenței lor asupra **FO** definite în continuare.

Proiectarea și realizarea experimentului presupune parcurgerea și particularizarea etapelor a)...f) prezentate în paragraful 4.3.1.[84]:

a) ca **FO** au fost alese elementele mulțimii **T** (fig.4.8)[33]:

-  $Y_{A1} = B \Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea superioară a **OP** din **PMMA**;

-  $Y_{A2} = b \Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea inferioară a **OP** din **PMMA**;

b) ca **FI** de ierarhizat au fost identificate următoarele mărimi, elemente ale mulțimilor **L**, **M**, **G** și **PR** (fig.4.8):

-  $X_{A1} = E_{L6} \Rightarrow$  puterea **FL**;

-  $X_{A2} = E_{LMG1} \Rightarrow$  viteza de tăiere;

-  $X_{A3} = E_{LM1} \Rightarrow$  poziția relativă **SL-OP**;

-  $X_{A4} = E_{LMG2} \Rightarrow$  raza traiectoriei;

-  $X_{A5} = S_{M2} \Rightarrow$  grosimea materialului **OP**;

-  $X_{A6} = S_{G2} \Rightarrow$  presiunea gazului de lucru;

-  $X_{A7} = S_{G1} \Rightarrow$  natura gazului de lucru;

-  $X_{A8} = S_{G3} \Rightarrow$  diametrul duzei de ieșire a jetului de gaz de lucru.

Numărul de nivele pentru fiecare dintre **FI**, precum și valorile atribuite fiecărui nivel au fost alese pe baza informațiilor inițiale privind domeniile de interes practic la **TL** a **PMMA** și apar în tab.4.1. Deoarece **OP** din **PMMA** pot fi de culori diferite, a fost realizat în prealabil un experiment de analiză dispersională unifactorială (anexa 2) pentru stabilirea semnificației culorii **PMMA** asupra lățimii tăieturilor.

**Valorile fizice ale nivelelor de variație ale FI la TL a PMMA**

Tabela 4.1

Nivel <b>FI</b>	$X_{A1}$ [W]	$X_{A2}$ [m/min]	$X_{A3}$ [-]	$X_{A4}$ [mm]	$X_{A5}$ [mm]	$X_{A6}$ [bar]	$X_{A7}$ [-]	$X_{A8}$ [mm]
1	100	1	0,6	20	1,6	1	O <sub>2</sub>	1,0
2	200	2	0,8	∞	2,6	3	N <sub>2</sub>	1,5
3	300	3	1,0	-	3,1	-	-	-
4	400	4	1,2	-	5,0	-	-	-

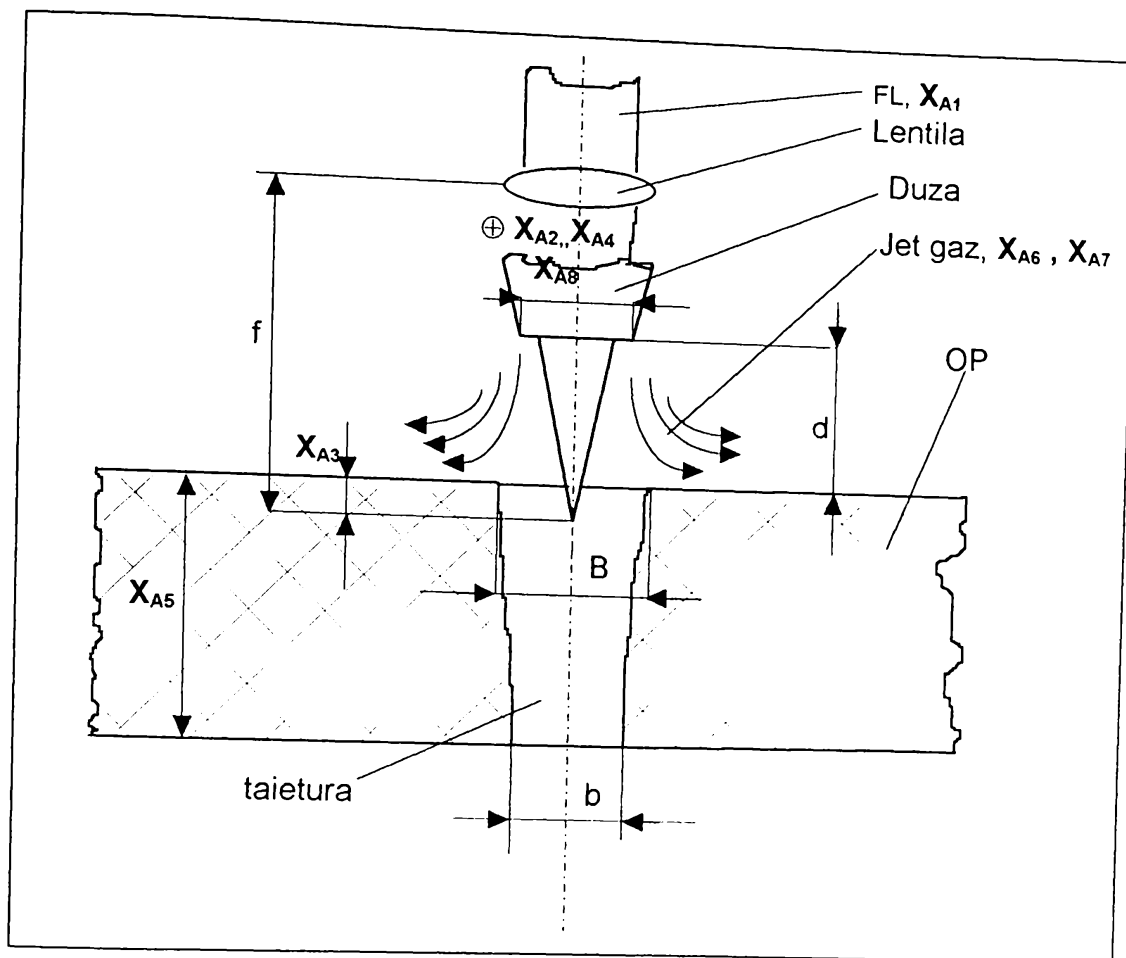


Fig.4.8

c) TL a OP s-a realizat pe utilajul CILAS 2000 ale cărui caracteristici au fost prezentate în paragraful 4.2; reglarea FI pe nivele s-a făcut cu ajutorul comenzii numerice NUM 750 pentru  $X_{A1}...X_{A5}$  și manual pentru  $X_{A6}...X_{A8}$ ;

d) volumul experimentului este  $N=16$  măsurări;

e) matricea-program a experimentului, caracterizată prin distribuția aleatoare a nivelelor FI  $X_{A1}...X_{A4}$  și ordonată a factorilor  $X_{A5}...X_{A8}$  (experiment tip Taguchi, pentru ușurarea efectuării reglajelor nivelelor FI [118]) apare în tab.4.2;

f) pentru realizarea TL, dispunerea OP a fost realizată după nivelele FI  $X_{A5}$  (grosimea OP) în ordinea furnizată de coloana corespunzătoare acestui FI din matricea-program a experimentului (tab.4.2) (fig.4.9); forma și poziția traiectoriilor rezultate în urma TL a OP apar în fig.4.9 numerotarea făcându-se în ordinea furnizată de coloana corespunzătoare numărului de ordine din matricea-program a experimentului; programul-sursă al comenzii numerice în vederea realizării TL a OP

este dat în anexa 3; valorile FO s-au determinat prin citire la un microscop monocular având o scală gradată cu incrementul de  $10^{-2}$  mm.

Matricea-program a experimentului la TL a PMMA

Tabela 4.2

Nr. crt.	Nivele de variație ale FI								Valori măsurate ale FO	
	$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$	$Y_{A1}$ [mm]	$Y_{A2}$ [mm]
1	4	4	2	1	1	1	2	1	0,26	0,26
2	3	1	1	2	2	1	2	1	0,21	0,19
3	2	1	3	2	2	2	2	1	0,23	0,24
4	1	1	4	2	3	2	2	1	0,55	0,26
5	4	3	2	2	3	2	1	1	0,53	0,42
6	3	2	4	1	4	2	1	1	0,39	0,16
7	2	4	3	1	4	1	1	1	0,32	0,00
8	2	3	3	2	4	1	1	1	0,34	0,00
9	1	2	4	1	4	1	2	2	0,30	0,00
10	3	4	2	1	1	1	2	2	0,27	0,26
11	4	1	3	2	1	2	2	2	0,34	0,28
12	4	2	2	2	2	2	2	2	0,21	0,42
13	3	4	1	1	2	2	1	2	0,40	0,00
14	2	2	4	2	3	2	1	2	0,51	0,27
15	1	3	1	1	3	1	1	2	0,24	0,00
16	1	3	1	1	1	1	1	2	0,19	0,14

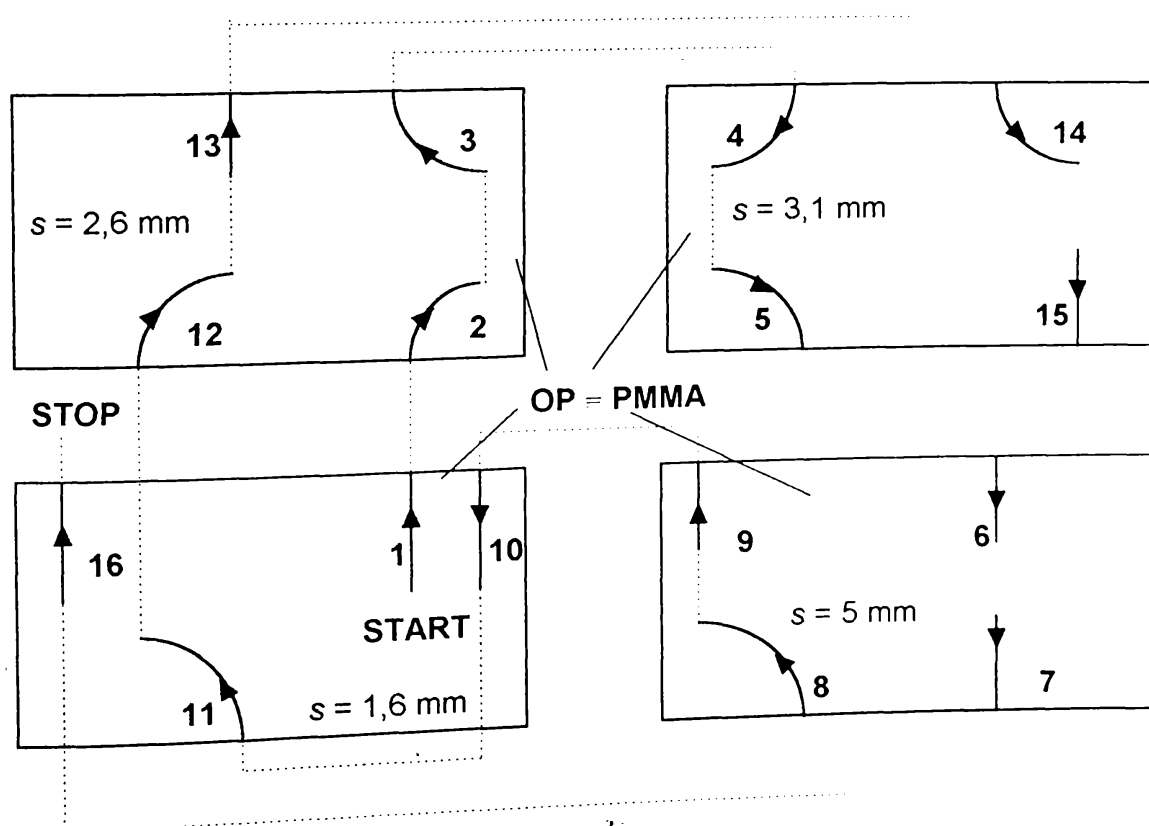


Fig. 4.9

#### 4.3.2.2 Prelucrarea rezultatelor măsurărilor si concluzii

În urma aplicării metodologiei de calcul [84], rezultă valorile corectate ale FO, pentru fiecare etapă de ierarhizare, pentru  $Y_{A1}$  (tab.4.3) si pentru  $Y_{A2}$  (tab.4.4).

**Valori corectate prin calcul ale funcției  $Y_{A1}$  la TL a PMMA**

Tabela 4.3

Nr. crt.	Etapa de calcul în vederea ierarhizării					
	II	III	IV	V	VI	VII
1	0,325625	0,37525	0,32044	0,33019	0,32856	0,33938
2	0,278125	0,32775	0,33194	0,35689	0,33546	0,34628
3	0,298125	0,24850	0,25269	0,25003	0,25879	0,26961
4	0,423125	0,37350	0,37769	0,34566	0,36268	0,37350
5	0,403125	0,35350	0,38306	0,39281	0,38848	0,37766
6	0,383125	0,33350	0,35456	0,32253	0,30110	0,29028
7	0,313125	0,36275	0,30794	0,30528	0,31404	0,30322
8	0,333125	0,38275	0,41231	0,40965	0,41841	0,40759
9	0,293125	0,34275	0,36381	0,33178	0,34880	0,35962
10	0,335625	0,38525	0,33044	0,34019	0,31876	0,32958
11	0,405625	0,35600	0,36091	0,35753	0,35320	0,36402
12	0,278125	0,22850	0,24956	0,25931	0,25498	0,26580
13	0,468125	0,41850	0,36369	0,38863	0,36720	0,35638
14	0,383125	0,33350	0,25456	0,32253	0,33129	0,32047
15	0,113125	0,16275	0,19231	0,21725	0,23427	0,22345
16	0,255625	0,30525	0,33481	0,35975	0,37677	0,36595

**Valori corectate prin calcul ale funcției  $Y_{A2}$  la TL a PMMA**

Tabela 4.4

Nr. crt.	Etapa de calcul în vederea ierarhizării					
	II	III	IV	V	VI	VII
1	0,10125	0,19438	0,15969	0,13145	0,15460	0,17775
2	0,28875	0,17500	0,15437	0,15105	0,17419	0,19734
3	0,29125	0,17750	0,15687	0,14074	0,11759	0,14074
4	0,26875	0,15500	0,12797	0,17568	0,15253	0,17568
5	0,26125	0,28000	0,25297	0,22473	0,20158	0,17843
6	0,16875	0,17063	0,25296	0,24964	0,22649	0,20334
7	0,05125	0,14438	0,22671	0,21058	0,23372	0,21057
8	0,05125	0,07000	0,15233	0,13620	0,15934	0,13619
9	0,00875	0,01068	0,09301	0,14072	0,16386	0,18701
10	0,10125	0,19438	0,15969	0,15637	0,17951	0,20266
11	0,33125	0,21750	0,18281	0,15457	0,13142	0,15457
12	0,26125	0,26313	0,24250	0,21426	0,19111	0,21426
13	0,09875	0,19188	0,17125	0,16793	0,14478	0,12163
14	0,27875	0,28063	0,25360	0,23747	0,21432	0,19117
15	0,09875	0,11750	0,09047	0,13818	0,16132	0,18447
16	0,23875	0,25750	0,22281	0,27052	0,29366	0,31681



Pe baza acestor valori și a matricii-program a experimentului s-au putut centraliza în tab.4.5 și respectiv tab.4.6 valorile medii ale **FO** pentru diferitele nivele de variație ale **FI**. Pe baza acestor valori medii, au rezultat domeniile de variație **DV** ale **FI**, cu ajutorul cărora s-a determinat pentru fiecare etapă de calcul **FI** cel mai important dintre cei rămași neierarhizați. Au rezultat astfel ierarhizările **FI** în ordinea importanței, prezentate în ultima linie a tab.4.5 și tab.4.6.

Ca urmare a analizei rezultatelor, se pot formula următoarele concluzii:

a) ordinea importanței **FI** diferă de la o **FO** la cealaltă; aceasta se întâmplă deoarece condițiile de tăiere diferă semnificativ pe cele două suprafețe ale **OP**: de exemplu, presiunea gazului de lucru,  $X_{A6}$ , influențează puternic condițiile de formare a tăieturii în partea superioară a **OP** (locul 2), în vreme ce pentru suprafața inferioară a **OP**, rolul acestui **FI** este puternic diminuat (locul 5);

b) pentru ambele **FO**, pe ultimele trei locuri se situează **FI**:

-  $X_{A4} \Rightarrow$  rază traiectorie;

-  $X_{A7} \Rightarrow$  natură gaz de lucru;

-  $X_{A8} \Rightarrow$  diametru duză ieșire jet gaz de lucru;

se propune, în vederea reducerii volumului experimentelor factoriale (paragraful 4.5), ca acești factori să fie considerați, într-o primă analiză, de importanță secundară pentru **FO** analizate și, ca atare, să nu fie incluși în continuare în modelarea experimentală, urmând ca rezultatele ulterioare privind fidelitatea modelelor experimentale de **TL** a **PMMA**, să confirme sau să infirme decizia luată:

c) există o apropiere între rezultatele obținute experimental și modelul analitic prezentat în paragraful 3.5, deoarece acesta include în ecuațiile de echilibru mărimile:

-  $P_L = X_{A1} \Rightarrow$  putere **FL**;

-  $v = X_{A2} \Rightarrow$  viteză de tăiere;

-  $s = X_{A5} \Rightarrow$  grosime **OP**,

care pentru ambele **FO** se situează între primii cinci **FI** în ordinea importanței;

d) în contextul celor prezentate mai sus, se intenționează ca, în continuare, modelarea experimentală să se facă pe baza unor experimente factoriale complete **EFC 2<sup>5</sup>**, care să includă primii cinci **FI** rezultați din ierarhizarea prin bilanț aleator:



Valori medii  $Y_{A1}$  si clasificarea FI la TL a PMMA

Tabela 4.5

Eta- pa	Niv. FI	Valori medii (calculate) pentru $Y_{A1}$							
		$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$
I	1	0,32000	0,33250	0,26000	0,29625	0,26500	0,26625	0,29625	0,35375
	2	0,35000	0,35250	0,31750	0,36500	0,26250	0,39500	0,36500	0,30750
	3	0,31750	0,32500	0,30750	-	0,45750	-	-	-
	4	0,33500	0,31250	0,43750	-	0,33750	-	-	-
	DV	0,03250	0,04000	0,17750	0,06875	0,19500	0,12875	0,06875	0,04625
II	1	0,27125	0,35125	0,27875	0,31100	-	0,28100	0,32975	0,34462
	2	0,33175	0,33425	0,33575	0,35025	-	0,38025	0,33150	0,31662
	3	0,36625	0,27625	0,33750	-	-	-	-	-
	4	0,35325	0,36075	0,37050	-	-	-	-	-
	DV	0,09500	0,08450	0,09175	0,03925	-	0,09925	0,00175	0,02800
III	1	0,29606	0,32643	0,30356	0,33575	-	-	0,33156	0,34468
	2	0,33187	0,30956	0,33562	0,32550	-	-	0,32968	0,31656
	3	0,36625	0,30106	0,33750	-	-	-	-	-
	4	0,32831	0,38543	0,34581	-	-	-	-	-
	DV	0,07018	0,08437	0,04225	0,01025	-	-	0,00187	0,02812
IV	1	0,31715	-	0,30568	0,32100	-	-	0,32334	0,34258
	2	0,33187	-	0,32087	0,34025	-	-	0,33790	0,31867
	3	0,34515	-	0,33328	-	-	-	-	-
	4	0,32831	-	0,36265	-	-	-	-	-
	DV	0,02800	-	0,05696	0,01925	-	-	0,01456	0,02391
V	1	0,31361	-	-	0,32445	-	-	0,33980	0,33913
	2	0,32187	-	-	0,33689	-	-	0,32144	0,32212
	3	0,35206	-	-	-	-	-	-	-
	4	0,33496	-	-	-	-	-	-	-
	DV	0,03845	-	-	0,01235	-	-	0,01835	0,01700
VI	1	-	-	-	0,32368	-	-	0,34144	0,33844
	2	-	-	-	0,33756	-	-	0,31980	0,32281
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,01387	-	-	0,02164	0,01563
VII	1	-	-	-	0,32098	-	-	-	0,33844
	2	-	-	-	0,34026	-	-	-	0,32281
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,01928	-	-	-	0,01563
<b>Clasificare</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>8</b>

Valori medii  $Y_{A2}$  si clasificarea FI la TL a PMMA

Tabela 4.6

Eta- pa	Niv. FI	Valori medii (calculate) pentru $Y_{A2}$							
		$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$
I	1	0,10000	0,24250	0,08250	0,10250	0,23500	0,10625	0,12375	0,19125
	2	0,12750	0,21250	0,34000	0,26000	0,21250	0,25625	0,23875	0,17125
	3	0,15250	0,14000	0,13000	-	0,23750	-	-	-
	4	0,34500	0,13000	0,17250	-	0,04000	-	-	-
	DV	0,24500	0,11250	0,25750	0,15750	0,19750	0,13750	0,11500	0,02000
II	1	0,15375	0,29500	-	0,10843	0,19312	0,11750	0,15593	0,18531
	2	0,16812	0,17937	-	0,25406	0,23500	0,24500	0,20656	0,17718
	3	0,16437	0,16250	-	-	0,22687	-	-	-
	4	0,23875	0,08812	-	-	0,07000	-	-	-
	DV	0,08500	0,20687	-	0,14562	0,16500	0,12750	0,05062	0,00812
III	1	0,13517	-	-	0,16016	0,21594	0,14547	0,18906	0,17086
	2	0,16812	-	-	0,20234	0,20187	0,21703	0,17344	0,19165
	3	0,18297	-	-	-	0,20828	-	-	-
	4	0,23875	-	-	-	0,09892	-	-	-
	DV	0,10358	-	-	0,04221	0,11701	0,07155	0,01561	0,02078
IV	1	0,13356	-	-	0,17207	-	0,15738	0,20288	0,18548
	2	0,19737	-	-	0,19043	-	0,20511	0,15961	0,17701
	3	0,18456	-	-	-	-	-	-	-
	4	0,20949	-	-	-	-	-	-	-
	DV	0,07592	-	-	0,01836	-	0,04773	0,04327	0,00846
V	1	-	-	-	0,18317	-	0,15810	0,16688	0,17750
	2	-	-	-	0,17932	-	0,20439	0,19561	0,18499
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,00384	-	0,04629	0,02873	0,00748
VI	1	-	-	-	0,19474	-	-	0,20439	0,17750
	2	-	-	-	0,16776	-	-	0,15810	0,18499
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,02698	-	-	0,04629	0,00749
VII	1	-	-	-	0,20053	-	-	-	0,17750
	2	-	-	-	0,16197	-	-	-	0,18499
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,03856	-	-	-	0,00749
<b>Clasificare</b>		<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>8</b>

- $X_{A1} \Rightarrow$  putere **FL**;
- $X_{A2} \Rightarrow$  viteză de tăiere;
- $X_{A3} \Rightarrow$  poziție relativă **FL-OP**;
- $X_{A4} \Rightarrow$  grosime material **OP**;
- $X_{A6} \Rightarrow$  presiune gaz de lucru.

### 4.3.3 Ierarhizarea factorilor de influență la tăierea laser a OL. (Experimentul 2)

#### *4.3.3.1 Proiectarea si realizarea experimentului*

În scopul ierarhizării influenței aceluiași opt **FI**,  $X_{A1} \dots X_{A8}$ , asupra aceluiași două **FO**,  $Y_{A1}$  și  $Y_{A2}$ , ca și în cazul **TL** a **PMMA**, a fost efectuat un experiment similar privind **TL** a unor **OP** sub formă de table din **OL**.

Etapele a)...d) sunt identice cu cele parcurse în paragraful 4.4.2.1, cu precizarea că valorile fizice atribuite fiecărui nivel al **FI** apar în tab.4.7.

**Valorile fizice ale nivelelor de variație ale FI la TL a OL**

Tabela 4.7

Nivel <b>FI</b>	$X_{A1}$ [W]	$X_{A2}$ [m/min]	$X_{A3}$ [-]	$X_{A4}$ [mm]	$X_{A5}$ [mm]	$X_{A6}$ [bar]	$X_{A7}$ [-]	$X_{A8}$ [mm]
1	800	1	0,6	20	1,0	1	O <sub>2</sub>	1,0
2	1000	2	0,8	$\infty$	1,2	3	N <sub>2</sub>	1,5
3	1200	3	1,0	-	1,5	-	-	-
4	1400	4	1,2	-	1,7	-	-	-

e) matricea-program a experimentului, caracterizată prin distribuția aleatoare a nivelelor **FI**  $X_{A1} \dots X_{A4}$  și ordonată a **FI**  $X_{A5} \dots X_{A8}$  apare în tab.4.8:

f) disponerea **OP** după grosime, în ordinea furnizată de coloana factorului  $X_{A5}$ , precum și traseul parcurs de **FL** în vederea realizării **TL** apar în fig.4.10; în anexa 3 este dat programul-sursă pentru comanda numerică a utilajului în vederea realizării **TL** conform matricii-program a experimentului; valorile măsurate ale **FO**  $Y_{A1}$  și  $Y_{A2}$  care apar în tab.4.8, s-au obținut în aceleași condiții ca și cele din paragraful 4.4.2.1 de la **TL** a **PMMA**.

Matricea-program a experimentului la TL a OL

Tabela 4.8

Nr. crt.	Nivele de variație ale FI								Valori măsurate ale FO	
	$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$	$Y_{A1}$ [mm]	$Y_{A2}$ [mm]
1	4	4	2	1	1	1	2	1	0,23	0,14
2	3	1	1	2	2	1	2	1	0,30	0,18
3	2	1	3	2	2	2	2	1	0,21	0,17
4	1	1	4	2	3	2	2	1	0,20	0,15
5	4	3	2	2	3	2	1	1	0,34	0,32
6	3	2	4	1	4	2	1	1	0,44	0,25
7	2	4	3	1	4	1	1	1	0,37	0,21
8	2	3	3	2	4	1	1	1	0,41	0,21
9	1	2	4	1	4	1	2	2	0,22	0,00
10	3	4	2	1	1	1	2	2	0,21	0,22
11	4	1	3	2	1	2	2	2	0,28	0,23
12	4	2	2	2	2	2	2	2	0,25	0,17
13	3	4	1	1	2	2	1	2	0,37	0,23
14	2	2	4	2	3	2	1	2	0,32	0,26
15	1	3	1	1	3	1	1	2	0,43	0,21
16	1	3	1	1	1	1	1	2	0,30	0,21

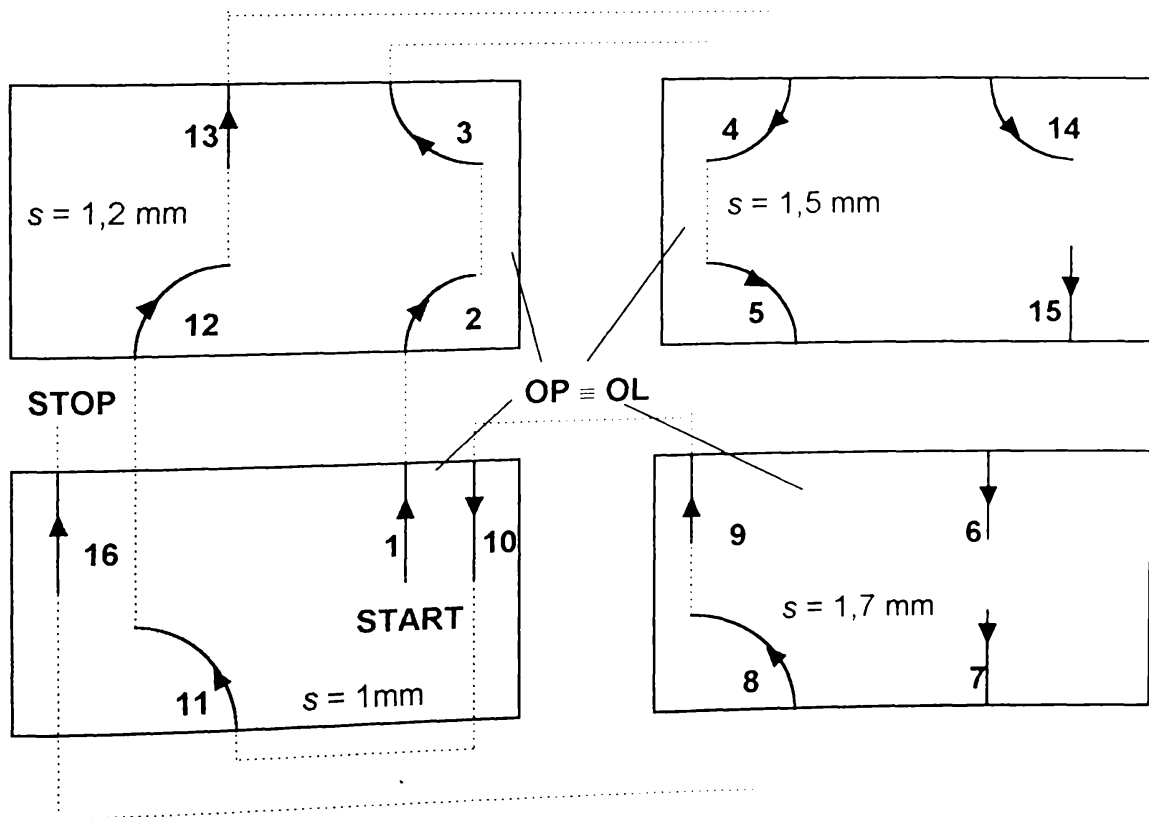


Fig.4.10

#### 4.3.3.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor și concluzii

Pe baza unei metodologii similare cu cea utilizată în paragraful 4.4.2.2 s-au determinat valorile corectate prin calcul ale  $FO Y_{A1}$  (tab.4.9) și respectiv  $Y_{A2}$  (tab.4.10).

#### Valori corectate prin calcul ale funcției $Y_{A1}$ la TL a OL

Tabela 4.9

Nr. crt.	Etapă de calcul în vederea ierarhizării					
	II	III	IV	V	VI	VII
1	0,2975	0,20375	0,31375	0,33078	0,33406	0,32967
2	0,3675	0,34250	0,34187	0,32578	0,31680	0,31241
3	0,2775	0,28875	0,28812	0,27203	0,26589	0,27027
4	0,2675	0,28500	0,29062	0,27453	0,28636	0,29074
5	0,2725	0,26875	0,27437	0,26468	0,26796	0,27234
6	0,3725	0,34750	0,32250	0,33125	0,34308	0,34746
7	0,3025	0,31375	0,28875	0,30578	0,29964	0,29525
8	0,3425	0,35375	0,32875	0,31906	0,31292	0,30853
9	0,2875	0,30500	0,28000	0,28875	0,30058	0,29619
10	0,2775	0,25250	0,27250	0,28953	0,29281	0,28842
11	0,3475	0,34375	0,36375	0,34766	0,34152	0,34590
12	0,3175	0,31375	0,31312	0,32187	0,32515	0,32953
13	0,3025	0,27750	0,27687	0,29390	0,28492	0,28930
14	0,2525	0,26375	0,26937	0,27812	0,28995	0,29433
15	0,3625	0,38000	0,38562	0,37593	0,36695	0,36256
16	0,2325	0,25000	0,27000	0,26031	0,25133	0,24694

#### Valori corectate prin calcul ale funcției $Y_{A2}$ la TL a OL

Tabela 4.10

Nr. crt.	Etapă de calcul în vederea ierarhizării					
	II	III	IV	V	VI	VII
1	0,18	0,1425	0,13062	0,14218	0,15195	0,15913
2	0,22	0,1975	0,20687	0,20813	0,19875	0,20593
3	0,21	0,2150	0,22437	0,20343	0,19405	0,18686
4	0,19	0,2450	0,20812	0,21625	0,20687	0,19968
5	0,28	0,2425	0,20562	0,21718	0,21108	0,20389
6	0,21	0,1875	0,22687	0,23500	0,24070	0,23351
7	0,17	0,1750	0,21437	0,19343	0,20320	0,21038
8	0,17	0,1750	0,21437	0,19343	0,18733	0,19451
9	0,04	0,0950	0,13437	0,14250	0,14820	0,15538
10	0,26	0,2375	0,22562	0,23718	0,24695	0,25413
11	0,27	0,2325	0,22062	0,19968	0,19030	0,18311
12	0,21	0,1725	0,18187	0,19343	0,19913	0,19194
13	0,19	0,1675	0,17687	0,17813	0,18790	0,18071
14	0,22	0,2250	0,18812	0,19625	0,20195	0,19476
15	0,17	0,2250	0,18812	0,18938	0,18328	0,19046
16	0,17	0,2250	0,21312	0,21438	0,20828	0,21546

iar apoi, etapizat s-au calculat valorile medii ale **FO** pentru diferitele nivele ale **FI**, rezultând clasificarea în ordinea importanței a **FI** analizați pentru  $Y_{A1}$  (tab.4.11) și respectiv pentru  $Y_{A2}$  (tab.4.12).

În urma prelucrării rezultatelor experimentale se pot formula următoarele concluzii:

a) pe ultimele două locuri în ordinea importanței se situează, atât în cazul **FO**  $Y_{A1}$  cât și al **FO**  $Y_{A2}$ , **FI**:

-  $X_{A4} \Rightarrow$  rază traiectorie;

-  $X_{A8} \Rightarrow$  diametru duză de suflare a gazului de lucru;

b) ca și în cazul **TL** a **PMMA**, și la **TL** a **OL**, ordinea importanței **FI** diferă de la o **FO** la alta datorită condițiilor diferite în care are loc **TL** pe cele două suprafețe ale **OP**;

c) pe primul loc în ordinea importanței, atât în cazul **FO**  $Y_{A1}$  cât și al **FO**  $Y_{A2}$ , se situează  $X_{A7} \Rightarrow$  natură gaz de lucru;

d) există o apropiere între rezultatele obținute experimental și modelul analitic prezentat în paragraful 3.5, deoarece acesta include în ecuațiile de echilibru mărimile:

-  $P_L = X_{A1} \Rightarrow$  putere **FL**;

-  $v = X_{A2} \Rightarrow$  viteză de tăiere;

-  $s = X_{A5} \Rightarrow$  grosime **OP**,

care pentru ambele **FO** se situează între primii cinci **FI** în ordinea importanței; acest aspect este valabil [80],[82], și pentru **TL** a unor **OP** din materiale de altă natură (furnir, materiale textile, piele și înlocuitori); rezultă că este pe deplin justificată includerea acestor **FI** între mărimile pe baza cărora au fost elaborate modelele analitice și realizate reprezentările grafice din capitolul 3;

Din compararea rezultatelor de mai sus cu cele de la **TL** a **PMMA**, rezultă:

a) cele două materiale ale **OP**, **PMMA** și **OL**, se comportă esențial diferit din punct de vedere al mecanismului prin care are loc **TL** (ceea ce reprezintă o confirmare experimentală a celor prezentate în capitolele 2 și 3) și aceasta deoarece, în vreme ce la **TL** a **OL** natură gazului de lucru este un **FI** de primă importanță (locul

Valori medii  $Y_{A1}$  si clasificarea FI la TL a OL

Tabela 4.11

Eta- pa	Niv. FI	Valori medii (calculate) pentru $Y_{A1}$							
		$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$
I	1	0,2875	0,2475	0,3500	0,32125	0,2550	0,30875	0,3725	0,3125
	2	0,3275	0,3075	0,2575	0,28875	0,2825	0,30125	0,2375	0,2975
	3	0,3300	0,3700	0,3175	-	0,3225	-	-	-
	4	0,2750	0,2950	0,2950	-	0,3600	-	-	-
	DV	0,0550	0,1225	0,0925	0,03250	0,1050	0,00750	0,1350	0,0150
II	1	0,28750	0,3150	0,31625	0,30437	0,28875	0,30875	-	0,3125
	2	0,29375	0,3075	0,29125	0,30562	0,31625	0,30125	-	0,2975
	3	0,33000	0,3025	0,31750	-	0,28875	-	-	-
	4	0,30875	0,2950	0,29500	-	0,32625	-	-	-
	DV	0,04250	0,0200	0,02625	0,00125	0,03750	0,00750	-	0,0150
III	1	-	0,31500	0,31250	0,30250	0,28500	0,31141	-	0,31172
	2	-	0,30750	0,28219	0,30750	0,30562	0,29859	-	0,29828
	3	-	0,31312	0,32500	-	0,29937	-	-	-
	4	-	0,28437	0,30031	-	0,33000	-	-	-
	DV	-	0,03062	0,04281	0,00500	0,04500	0,01281	-	0,01344
IV	1	-	0,32109	0,31859	0,30125	-	0,31015	-	0,30609
	2	-	0,29625	0,29343	0,30815	-	0,29984	-	0,30390
	3	-	0,31468	0,31734	-	-	-	-	-
	4	-	0,28797	0,29062	-	-	-	-	-
	DV	-	0,03312	0,02797	0,00750	-	0,01071	-	0,00219
V	1	-	-	0,31398	0,30953	-	0,31199	-	0,30299
	2	-	-	0,30171	0,30047	-	0,29801	-	0,30701
	3	-	-	0,31113	-	-	-	-	-
	4	-	-	0,29316	-	-	-	-	-
	DV	-	-	0,02082	0,00906	-	0,01398	-	0,00402
VI	1	-	-	-	0,30917	-	0,30939	-	0,30339
	2	-	-	-	0,30083	-	0,30061	-	0,30666
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,00834	-	0,00877	-	0,00279
VII	1	-	-	-	0,30697	-	-	-	0,30333
	2	-	-	-	0,30303	-	-	-	0,30667
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,00395	-	-	-	0,00333
<b>Clasificare</b>		<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>8</b>



Valori medii  $Y_{A2}$  si clasificarea FI la TL a OL

Tabela 4.12

Eta- pa	Niv. FI	Valori medii (calculate) pentru $Y_{A2}$							
		$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{A4}$	$X_{A5}$	$X_{A6}$	$X_{A7}$	$X_{A8}$
I	1	0,1425	0,1825	0,2075	0,18375	0,2000	0,1725	0,2375	0,20375
	2	0,2125	0,1700	0,2125	0,21125	0,1875	0,2225	0,1575	0,19125
	3	0,2200	0,2375	0,2050	-	0,2350	-	-	-
	4	0,2150	0,2000	0,1650	-	0,1675	-	-	-
	DV	0,0775	0,0675	0,0475	0,02750	0,0675	0,0500	0,0800	0,01250
II	1	0,1425	0,2225	0,1875	0,17375	0,2200	0,1725	-	0,20375
	2	0,1925	0,1700	0,2325	0,22125	0,2075	0,2225	-	0,19125
	3	0,2200	0,1975	0,2050	-	0,2150	-	-	-
	4	0,2350	0,2000	0,1650	-	0,1475	-	-	-
	DV	0,0925	0,0525	0,0675	0,04750	0,0725	0,0500	-	0,01250
III	1	-	0,22250	0,20375	0,18187	0,20937	0,18406	-	0,19750
	2	-	0,17000	0,19875	0,21312	0,18812	0,21094	-	0,19750
	3	-	0,21687	0,19937	-	0,23437	-	-	-
	4	-	0,18062	0,18812	-	0,18812	-	-	-
	DV	-	0,05250	0,01562	0,03125	0,07625	0,02687	-	0,00000
IV	1	-	0,21499	0,19624	0,18874	-	0,19093	-	0,20390
	2	-	0,18281	0,18593	0,20625	-	0,20407	-	0,19110
	3	-	0,20531	0,21843	-	-	-	-	-
	4	-	0,18687	0,18937	-	-	-	-	-
	DV	-	0,03219	0,03250	0,01751	-	0,01313	-	0,01280
V	1	-	0,20687	-	0,19152	-	0,19008	-	0,20113
	2	-	0,19179	-	0,20348	-	0,20492	-	0,19387
	3	-	0,20359	-	-	-	-	-	-
	4	-	0,18773	-	-	-	-	-	-
	DV	-	0,01914	-	0,01195	-	0,01484	-	0,00726
VI	1	-	-	-	0,19631	-	0,19032	-	0,19924
	2	-	-	-	0,19869	-	0,20468	-	0,19576
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,00238	-	0,01436	-	0,00348
VII	1	-	-	-	0,19989	-	-	-	0,19924
	2	-	-	-	0,19510	-	-	-	0,19576
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DV	-	-	-	0,00479	-	-	-	0,00347
<b>Clasificare</b>		<b>2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>8</b>



1 atât pentru  $Y_{A1}$  cât și pentru  $Y_{A2}$ ), la TL a PMMA același FI este de mică importanță (locul 6 atât pentru  $Y_{A1}$  cât și pentru  $Y_{A2}$ ); rezultă că, în continuare, TL a OL este justificat să fie analizată numai în prezența unui gaz de lucru reactiv ( $O_2$ ). În vreme ce la TL a PMMA, natura gazului de lucru are importanță secundară; aceste aspecte au multiple confirmări în literatura de specialitate [56], [98], [102], [116]:

b) în ipoteza rezultată din concluzia a), că TL a OL se va face în continuare exclusiv în prezența  $O_2$  ca gaz de lucru, se propune ca modelarea experimentală să se facă într-o primă etapă, la fel ca și în cazul TL a PMMA, pe baza unor experimente factoriale complete, EFC 2<sup>5</sup>, care să includă primii cinci FI în ordinea importanței lor (excluzând natura gazului de lucru) și anume:

- $X_{A1} \Rightarrow$  putere FL;
- $X_{A2} \Rightarrow$  viteză de tăiere;
- $X_{A3} \Rightarrow$  poziție relativă SL-OP;
- $X_{A5} \Rightarrow$  grosime material OP;
- $X_{A6} \Rightarrow$  presiune gaz de lucru;

urmează ca, în urma comparării valorilor estimate cu ajutorul modelelor găsite, cu valorile determinate prin măsurare, să se decidă dacă este oportună includerea și a altor FI, sau rezultatele obținute sunt suficient de fidele încât ele să poată fi efectiv utilizate în practică; oportunitatea includerii în experimentele factoriale de noi FI, trebuie luată în condițiile în care se cunoaște că orice factor suplimentar introdus dublează volumul experimentului și aduce complicații considerabile în prelucrarea, dar mai ales în interpretarea datelor experimentale.

c) din concluziile prezentate în paragraful 4.4, rezultă că atât modelarea experimentală a TL a OL cât și modelarea experimentală a TL a PMMA, vor fi făcute prin același tip de experiment factorial, incluzând aceiași FI, ceea ce oferă în continuare posibilități de generalizare asupra modului în care se poate realiza modelarea experimentală a TL a materialelor.

#### 4.4 Modelarea prin experiment factorial complet a tăierii cu laseri CO<sub>2</sub> cw

##### 4.4.1 Aplicarea metodei experimentului factorial complet la modelarea tăierii laser

Modelarea prin experiment factorial este la ora actuală una dintre cele mai eficiente și în același timp cele mai utilizate metode de modelare experimentală. Ea este prezentată în detaliu în numeroase lucrări de specialitate [3],[77],[84]. Metodologia de explicitare a modelelor empirice este relativ laborioasă și include următoarele etape principale [84]:

- a) stabilirea domeniului de experimentare, care presupune:
  - stabilirea nivelului de bază (punctul central al experimentării);
  - stabilirea intervalului de variație al fiecărui **FI**;
- b) construcția matricii-program a experimentării și realizarea măsurărilor;
- c) determinarea modelului matematic al experimentului care presupune:
  - alegerea modelului matematic (de regulă polinomial), calculul coeficienților de regresie ai modelului și implicit, explicitarea modelului matematic adoptat;
  - analiza statistică din trei puncte de vedere a modelului obținut:
    - estimarea erorii experimentale;
    - verificarea semnificației statistice a coeficienților de regresie;
    - verificarea adecvănței (concordanței) valorilor **FO** calculate cu modelul empiric, cu valorile reale (măsurate) ale **FO**.

Calcululele sunt însă mult facilitate de existența unor programe de calculator, extrem de performante, între care și programul STATGRAPHICS [131], utilizat pentru prelucrarea datelor experimentale din acest paragraf.

Pentru obținerea modelelor experimentale, atât în cazul TL a PMMA, cât și a OL, au fost aleși **FI** rezultați mai importanți în urma ierarhizării prin bilanț aleator (vezi paragraful 4.4):

- $X_{F1} = v$  [m/min]  $\Rightarrow$  viteza de tăiere;
- $X_{F2} = P_L$  [W]  $\Rightarrow$  puterea **FL**;
- $X_{F3} = s$  [mm]  $\Rightarrow$  grosimea **OP**;

-  $X_{F4} = pr [-]$   $\Rightarrow$  poziția relativă **SL-OP**;

-  $X_{F5} = p$  [bar]  $\Rightarrow$  presiunea gazului de lucru.

Se observă că **FI** au fost renotați față de paragraful 4.4. Notățiile se păstrează atât pentru modelarea experimentală a **TL** a **PMMA** (paragraful 4.4.2.), cât și pentru modelarea experimentală a **TL** a **OL** (paragraful 4.4.3.).

Ca **FO**, pentru ambele materiale, au fost definite următoarele mărimi de interes tehnologic (în majoritate elemente ale mulțimii **E**, care depind explicit de lățimea tăieturii, conform celor precizate în paragraful 4.1):

-  $Y_{F1} = B$  [mm]  $\Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea superioară a **OP** (vezi fig.4.8);

-  $Y_{F2} = b$  [mm]  $\Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea inferioară a **OP** (vezi fig.4.8)

-  $Y_{F3} = |1 - \frac{b}{B}| [-]$   $\Rightarrow$  paralelismul pereților tăieturii;

-  $Y_{F4} = \frac{b+B}{2}$  [mm]  $\Rightarrow$  lățimea medie a tăieturii;

-  $Y_{F5} = \frac{b+B}{2} \cdot s$  [mm<sup>2</sup>]  $\Rightarrow$  aria tăieturii;

-  $Y_{F6} = \frac{b+B}{2} \cdot s \cdot v \cdot 10^3$  [mm<sup>3</sup>/min]  $\Rightarrow$  volumul de material erodat în unitatea de timp (debitul prelucrării);

-  $Y_{F7} = \frac{2P_L}{(b+B) \cdot s}$  [W/mm<sup>2</sup>]  $\Rightarrow$  energia laser consumată în unitatea de timp, pe unitatea de suprafață de material erodat;

-  $Y_{F8} = \frac{120P_L}{(b+B) \cdot s \cdot v \cdot 10^3}$  [J/mm<sup>3</sup>]  $\Rightarrow$  energia laser consumată pentru erodarea unității de volum de material.

La definirea **FO** s-a făcut ipoteza simplificatoare că secțiunea tăieturii are o formă trapezoidală, cu bazele  $B$ , respectiv  $b$ .

Scopul experimentelor factoriale realizate în continuare este de explicitare a polinoamelor de regresie și de precizare a concordanței între rezultatele estimate cu ajutorul lor și cele măsurate, pentru a decide în ce măsură modelele experimentale găsite pot fi utilizate în scopuri tehnologice, în spațiul multifactorial ales spre explorare. În vederea asigurării cursivității expunerii, algoritmul de calcul nu este prezentat, el putând fi găsit în lucrarea [84].

**FO** caracterizează atât geometria tăieturii cât și consumurile energetice specifice.

fiind de remarcat următoarele:

-  $Y_{F2}$  este FO ale cărei valori zero determină vitezele maxime de tăiere,  $v_{max}$ , în condiții date, definite ca vitezele relative FL-OP maxime care asigură tăierea completă a OP; punerea problemei în acest mod constituie un punct de vedere nou, în raport cu cel întâlnit în literatura de specialitate, deoarece în definirea  $v_{max}$  se pleacă de la un element al mulțimii FO și nu de la unul al mulțimii FI,  $v$ ;

- FO  $Y_{F4}$  este notată cu  $h_m$  în modelele analitice analizate în capitolul 3; pe baza valorilor acestei FO au fost făcute comparațiile între rezultatele furnizate de modelele analitice și cele determinate prin măsurare (tab.3.1...tab.3.3)

- din relațiile de definire a FO  $Y_{F3}...Y_{F8}$  se observă că toate depind de mărimile  $B$  respectiv  $h$ , ceea ce permite extinderea rezultatelor ierarhizării prin bilanț aleator și asupra acestor FO, deoarece, dacă un FI este de importanță neglijabilă atât pentru  $B$  cât și pentru  $h$ , el are șanse minime de a fi important pentru o funcție compusă a lui  $B$  cu  $h$ .

#### 4.4.2 Modelarea tăierii laser a PMMA. (Experimentul 3.)

##### 4.4.2.1 Proiectarea și realizarea experimentului

Presupune parcurgerea etapelor a) și b) prezentate în paragraful 4.4.1:

a) Conform celor precizate în paragraful 4.1., coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelelor superior și inferior, precum și intervalele de variație pentru fiecare FI,  $X_{F1}...X_{F8}$ , au fost alese pe baza informațiilor apriorice (din modelarea analitică anterioară, din literatura de specialitate și pe baza experienței acumulate în Laboratorul de Lasere al Catedrei TM), în domeniul de valabilitate al ierarhizării FI, și apar în tab.4.13.

Valori factori de influență la TL a PMMA

Tabela 4.13

Parametru	Cod	Valori fizice				
		$X_{F1}$ [m/min]	$X_{F2}$ [W]	$X_{F3}$ [mm]	$X_{F4}$ [-]	$X_{F5}$ [bar]
Nivel superior	+1	3	400	5,0	1,2	3
Nivel inferior	-1	1	200	2,6	1,0	1
Punct central	0	2	300	3,8	1,1	2
Interval de variație	$\Delta I$	1	100	1,2	0,1	1

b) Matricea-program specifică experimentelor factoriale complete de ordinul întâi cu cinci FI, EFC 2<sup>5</sup>, precum și valorile măsurate ale FO Y<sub>F1</sub> și Y<sub>F2</sub> apar în tab.4.14.

**Matricea-program a experimentului EFC 2<sup>5</sup> de TL a PMMA** Tabela 4.14

Nr. crt.	Valori codificate nivele FI					Valori măsurate FO	
	X <sub>F1</sub>	X <sub>F2</sub>	X <sub>F3</sub>	X <sub>F4</sub>	X <sub>F5</sub>	Y <sub>F1</sub>	Y <sub>F2</sub>
1	+1	+1	+1	+1	+1	0,25	0.15
2	-1	+1	+1	+1	+1	0,25	0.38
3	+1	-1	+1	+1	+1	0,22	0.00
4	-1	-1	+1	+1	+1	0,22	0.20
5	+1	+1	-1	+1	+1	0,36	0.30
6	-1	+1	-1	+1	+1	0,36	0.48
7	+1	-1	-1	+1	+1	0,25	0.17
8	-1	-1	-1	+1	+1	0,32	0.26
9	+1	+1	+1	-1	+1	0,23	0.18
10	-1	+1	+1	-1	+1	0,24	0.41
11	+1	-1	+1	-1	+1	0,19	0.00
12	-1	-1	+1	-1	+1	0,21	0.20
13	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0.31
14	-1	+1	-1	-1	+1	0,26	0.40
15	+1	-1	-1	-1	+1	0,20	0.15
16	-1	-1	-1	-1	+1	0,25	0.25
17	+1	+1	+1	+1	-1	0,28	0.16
18	-1	+1	+1	+1	-1	0,29	0.39
19	+1	-1	+1	+1	-1	0,24	0.00
20	-1	-1	+1	+1	-1	0,24	0.18
21	+1	+1	-1	+1	-1	0,35	0.30
22	-1	+1	-1	+1	-1	0,38	0.45
23	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0.17
24	-1	-1	-1	+1	-1	0,33	0.28
25	+1	+1	+1	-1	-1	0,25	0.16
26	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0.39
27	+1	-1	+1	-1	-1	0,21	0.00
28	-1	-1	+1	-1	-1	0,22	0.18
29	+1	+1	-1	-1	-1	0,26	0.31
30	-1	+1	-1	-1	-1	0,26	0.42
31	+1	-1	-1	-1	-1	0,22	0.14
32	-1	-1	-1	-1	-1	0,24	0.23

Tăieturile au fost efectuate pe utilajul CILAS 2000, dispunerea OP în vederea prelucrării apărând în fig.4.11, iar programul sursă pentru comanda numerică a utilajului este dat în anexa 4.

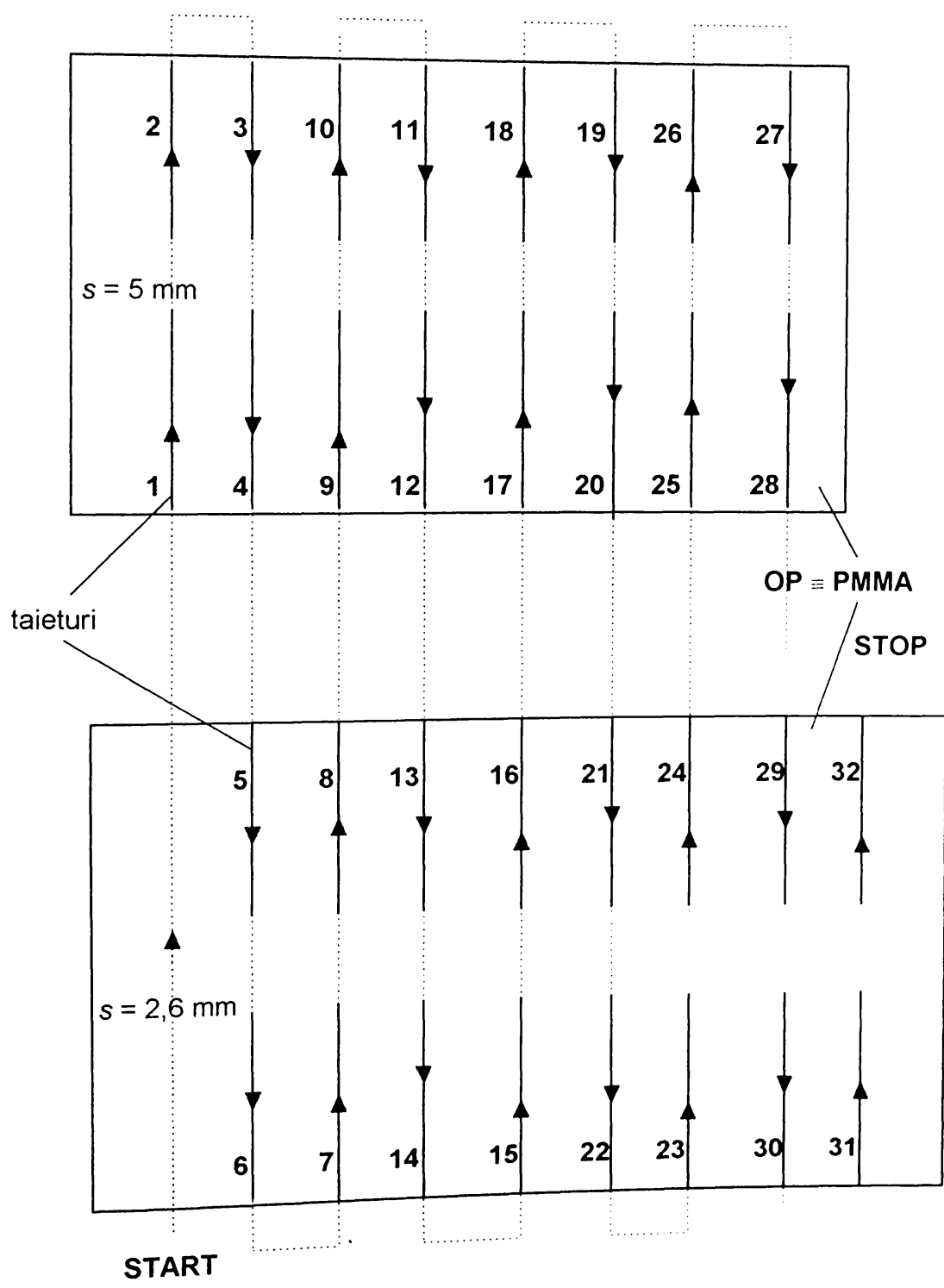


Fig.4.11

Măsurările au fost realizate pentru  $Y_{F1}$  și  $Y_{F2}$  cu ajutorul microscopului cu scală gradată utilizat și la celelalte experimente, iar valorile FO  $Y_{F3} \dots Y_{F8}$ , calculate pe baza relațiilor de definiție din paragraful 4.4.1, apar în tab.4.15.

**Valori ale FO rezultate pe baza măsurărilor la TL a PMMA**

Tabela 4.15

Nr. crt.	Funcții obiectiv					
	$Y_{F3}$ [-]	$Y_{F4}$ [mm]	$Y_{F5}$ [mm <sup>2</sup> ]	$Y_{F6}$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_{F7}$ [W/mm <sup>2</sup> ]	$Y_{F8}$ [J/mm <sup>3</sup> ]
1	0,400	0,200	1,000	3000	400	8,0
2	0,520	0,315	1,575	1575	254	15,2
3	1,000	0,110	0,550	1650	364	7,3
4	0,091	0,210	1,050	1050	190	11,4
5	0,167	0,330	0,858	2574	466	9,3
6	0,333	0,420	1,092	1092	366	22,0
7	0,320	0,210	0,546	1638	366	7,3
8	0,187	0,290	0,754	754	265	15,9
9	0,217	0,205	1,025	3075	390	7,8
10	0,708	0,325	1,625	1625	246	14,8
11	1,000	0,095	0,475	1425	421	8,4
12	0,048	0,205	1,025	1025	195	11,7
13	0,148	0,290	0,754	2262	531	10,6
14	0,538	0,330	0,858	858	466	28,0
15	0,250	0,175	0,455	1365	440	8,8
16	0,000	0,250	0,650	650	308	18,5
17	0,429	0,220	1,100	3300	364	7,3
18	0,345	0,340	1,700	1700	235	14,1
19	1,000	0,120	0,600	1800	333	6,7
20	0,250	0,210	1,050	1050	190	11,4
21	0,143	0,325	0,845	2535	473	9,5
22	0,184	0,415	1,079	1079	371	22,2
23	0,370	0,220	0,572	1716	350	7,0
24	0,152	0,305	0,793	793	252	15,1
25	0,360	0,205	1,025	3075	390	7,8
26	0,444	0,330	1,650	1650	242	14,5
27	1,000	0,105	0,525	1575	381	7,6
28	0,182	0,200	1,000	1000	200	12,0
29	0,192	0,285	0,741	2223	540	10,8
30	0,615	0,340	0,884	884	452	27,1
31	0,364	0,180	0,468	1404	427	8,5
32	0,042	0,235	0,611	611	327	19,6

#### 4.4.2.2. Prelucrarea rezultatelor măsurărilor

Presupune parcurgerea punctului c) din paragraful 4.4.1 și a fost realizată cu ajutorul programului STATGRAPHICS [131], pe baza metodologiei din literatura de specialitate [77],[84], pentru fiecare FO, Y<sub>F1</sub> ... Y<sub>F8</sub>, fiind determinate următoarele:

a) influența FI și interacțiunile de ordinul I semnificative (tab.4.16 și tab.4.17);

b) coeficienții modelelor experimentale căutate, determinați pentru valorile codificate ale FI (tab.4.16) și respectiv pentru valorile fizice ale FI (tab.4.17); aceste modelele experimentale sunt polinoame algebrice de ordinul I ce au următoarea formă generală:

$$Y_{Fj} = b_{0j} + \sum_{i=1}^5 b_{ij} \cdot X_{Fij} + \sum_{u,i=1}^5 b_{iuj} \cdot X_{Fij} \cdot X_{Fuj} \quad \forall j = 1...8, \quad i \neq u \quad (4.1)$$

Particularizarea coeficienților  $b_{ij}$  și  $b_{iuj}$  individualizează modelul experimental aplicabil calculului valorilor unei anumite FO Y<sub>F1</sub>... Y<sub>F8</sub>.

**Coficienții și precizia de estimare ale modelelor experimentale obținute la TL a PMMA cu FI având valori codificate**

Tabela 4.16

Coeficient	Valori ale coeficienților modelelor experimentale pentru FO Y <sub>Fj</sub>							
	Y <sub>F1</sub>	Y <sub>F2</sub>	Y <sub>F3</sub>	Y <sub>F4</sub>	Y <sub>F5</sub>	Y <sub>F6</sub>	Y <sub>F7</sub>	Y <sub>F8</sub>
b <sub>0j</sub>	0,26219	0,23750	0,37497	0,24984	0,90422	1625,41	349,84	12,693
b <sub>1j</sub>	-0,00906	-0,08125	0,08503	-0,04516	-0,18303	538,16	64,91	-4,400
b <sub>2j</sub>	0,02281	0,08687	-0,01603	0,05484	0,20897	406,28	36,78	1,619
b <sub>3j</sub>	-0,02406	-0,05125	0,12466	-0,03766	0,15672	223,03	-50,16	-2,319
b <sub>4j</sub>	0,02594	neseemnif.	neseemnif.	0,01516	0,04353	81,22	-22,41	-0,837
b <sub>5j</sub>	-0,00719	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
b <sub>12j</sub>	0,00531	-0,00937	-0,18697	neseemnif.	neseemnif.	185,66	-7,28	-1,025
b <sub>13j</sub>	neseemnif.	-0,02375	0,09109	-0,00953	-0,09041	neseemnif.	15,78	1,637
b <sub>14j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	31,84	neseemnif.	0,344
b <sub>15j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
b <sub>23j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	-0,05572	neseemnif.	0,06759	120,28	-21,34	-0,806
b <sub>24j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
b <sub>25j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
b <sub>34j</sub>	-0,01531	neseemnif.	neseemnif.	-0,01172	-0,02634	-39,03	13,97	0,637
b <sub>35j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
b <sub>45j</sub>	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.	neseemnif.
Precizie estimare	92,10 [%]	98,63 [%]	84,45 [%]	98,71 [%]	98,90 [%]	99,11 [%]	98,30 [%]	98,64 [%]



c) precizia de estimatie a modelelor regresionale (tab.4.16 si tab.4.17) pe baza coeficientului de concordanta între valorile estimate si cele măsurate,  $R^2$  [131], pentru un prag de semnificatie  $\alpha_s = 0,05$ .

**Coeficientii si precizia de estimatie ale modelelor experimentale obtinute la TL a PMMA cu FI având valori fizice**

Tabela 4.17

Coeficient	Valori ale coeficientilor modelelor experimentale pentru FO $Y_{Fi}$							
	$Y_{F1}$	$Y_{F2}$	$Y_{F3}$	$Y_{F4}$	$Y_{F5}$	$Y_{F6}$	$Y_{F7}$	$Y_{F8}$
$b_{0j}$	-0,48437	0,09500	-1,21596	-0,34042	-1,17982	-671,839	855,057	59,5229
$b_{1j}$	-0,02500	0,02208	0,35747	-0,01497	0,10325	-369,094	36,776	-10,2917
$b_{2j}$	0,00012	0,00106	0,00534	0,00055	-0,00005	-3,459	1,189	0,0622
$b_{3j}$	0,12031	-0,00313	0,09135	0,09193	0,35378	242,943	-142,786	-8,4896
$b_{4j}$	0,74427	nesemnif.	nesemnif.	0,52266	1,26953	1411,300	-666,406	-35,4375
$b_{5j}$	-0,00719	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{12j}$	0,00005	-0,00009	-0,00186	nesemnif.	nesemnif.	1,857	-0,073	-0,0102
$b_{13j}$	nesemnif.	-0,01979	0,07591	-0,00794	-0,07533	nesemnif.	13,151	1,3646
$b_{14j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	318,438	nesemnif.	3,4375
$b_{15j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{23j}$	nesemnif.	nesemnif.	-0,00046	nesemnif.	0,00056	1,002	-0,178	-0,0067
$b_{24j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{25j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{34j}$	-0,12760	nesemnif.	nesemnif.	-0,09766	-0,21953	-325,260	116,406	5,3125
$b_{35j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{45j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
Precizie estimatie	92,10 [%]	98,63 [%]	84,45 [%]	98,71 [%]	98,90 [%]	99,11 [%]	98,30 [%]	98,64 [%]

De asemenea, pentru fiecare FO s-au realizat urmatoarele reprezentari grafice:

d) histograma efectelor, care pune în evidenta amplitudinea variatiei valorilor FO produsă când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior si cel superior (fig.4.12...fig.4.19);

e) compararea valorilor măsurate cu cele estimate cu ajutorul modelelor polinomiale găsite; aceasta permite, alături de precizia estimatiei, o apreciere rapida a fidelitatii modelelor polinomiale (fig.4.20...fig.4.27).

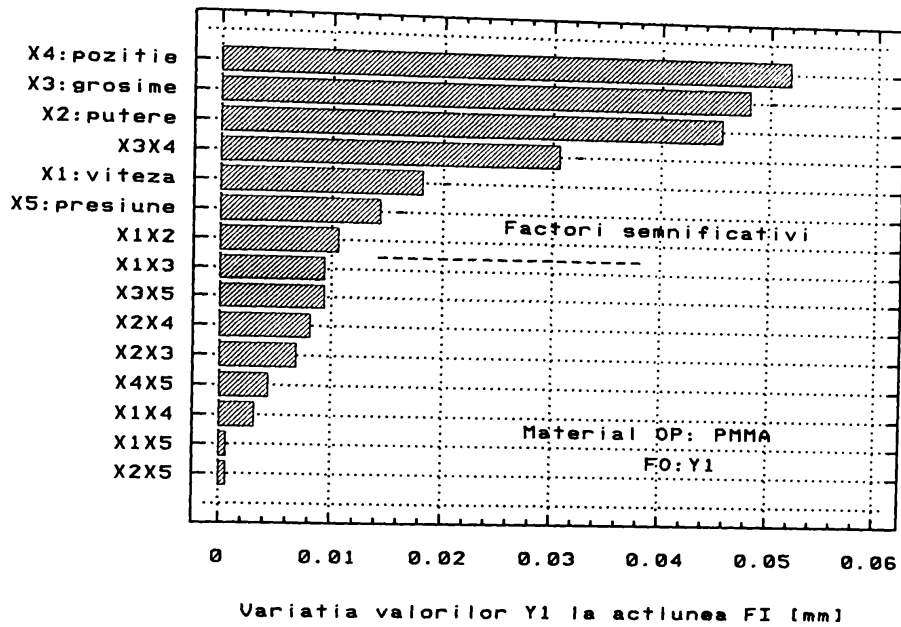


Fig. 4.12

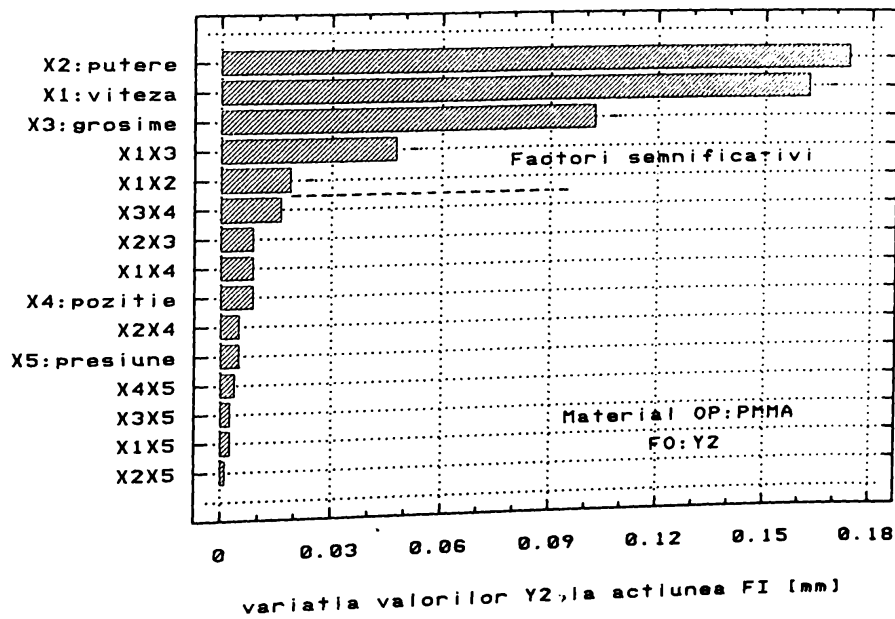


Fig. 4.13

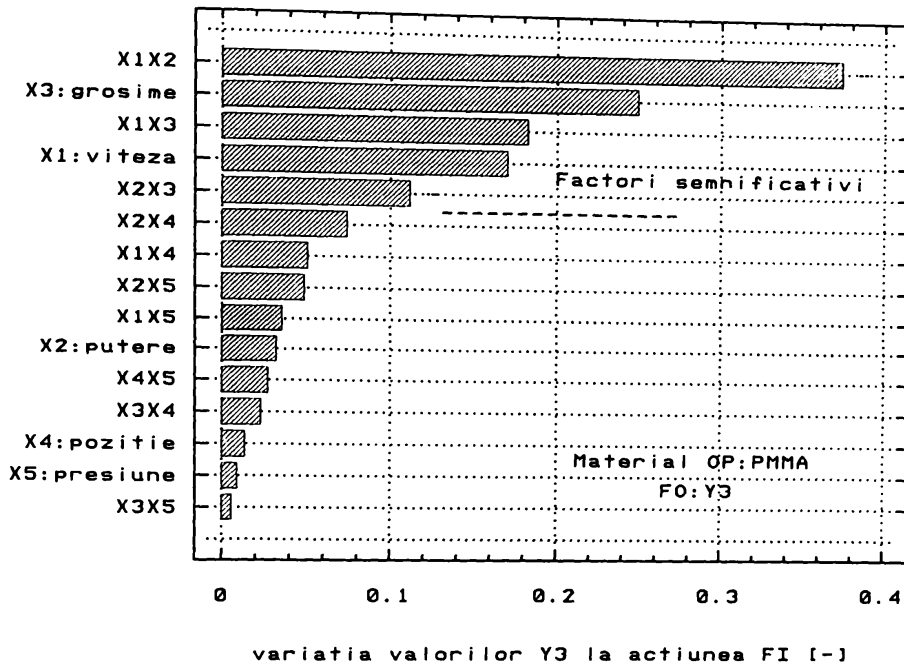


Fig. 4.14

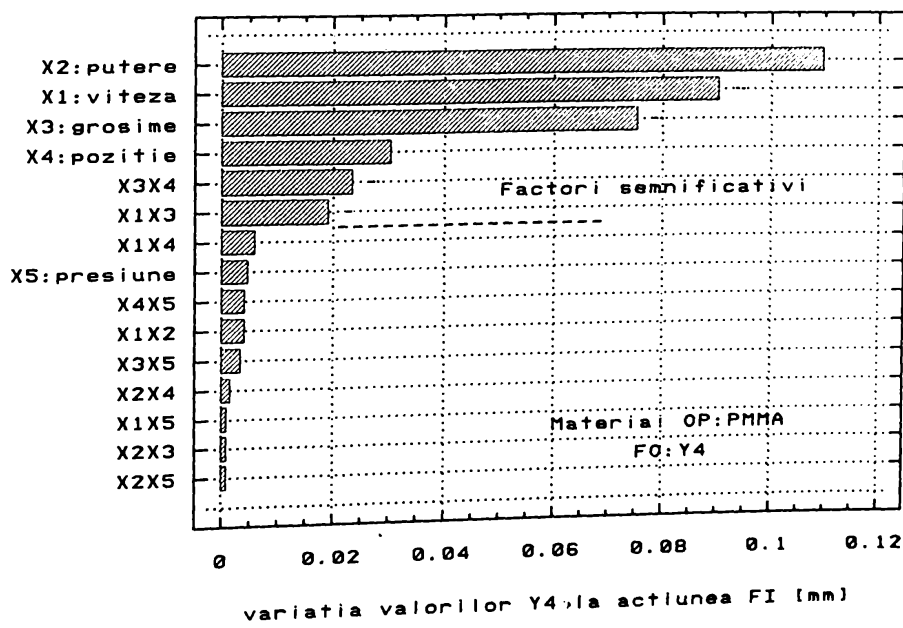


Fig. 4.15

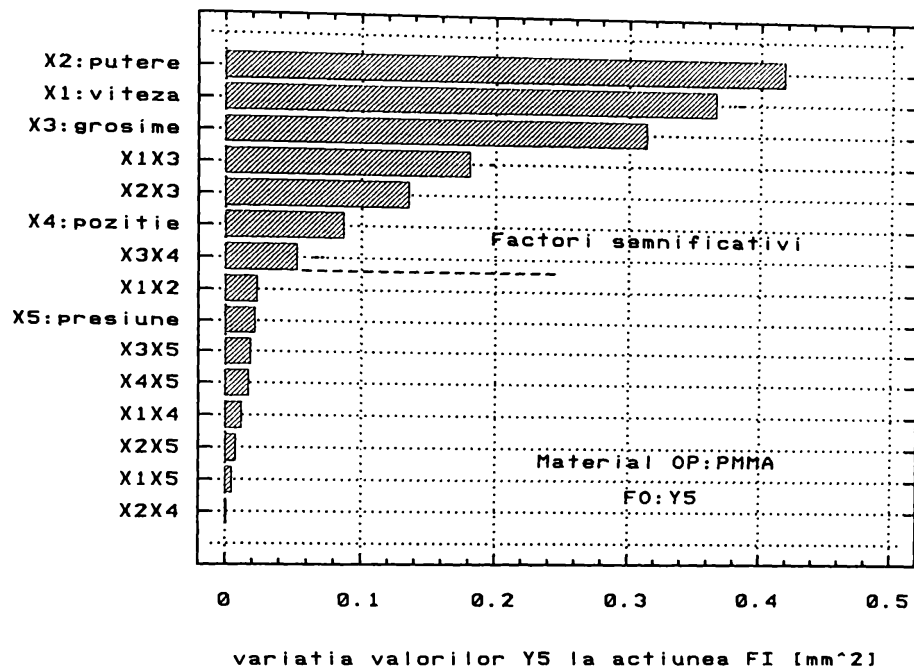


Fig. 4.16

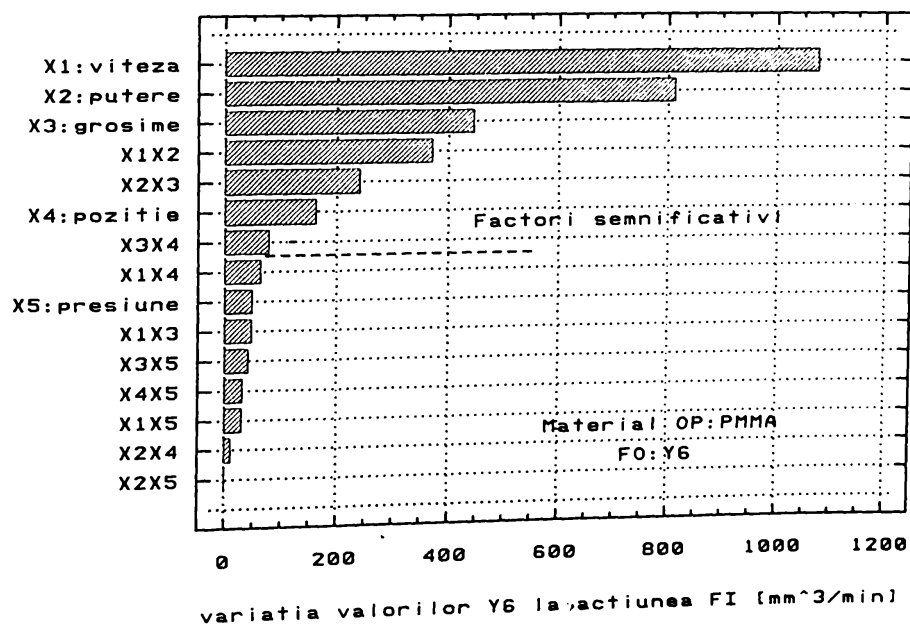


Fig. 4.17

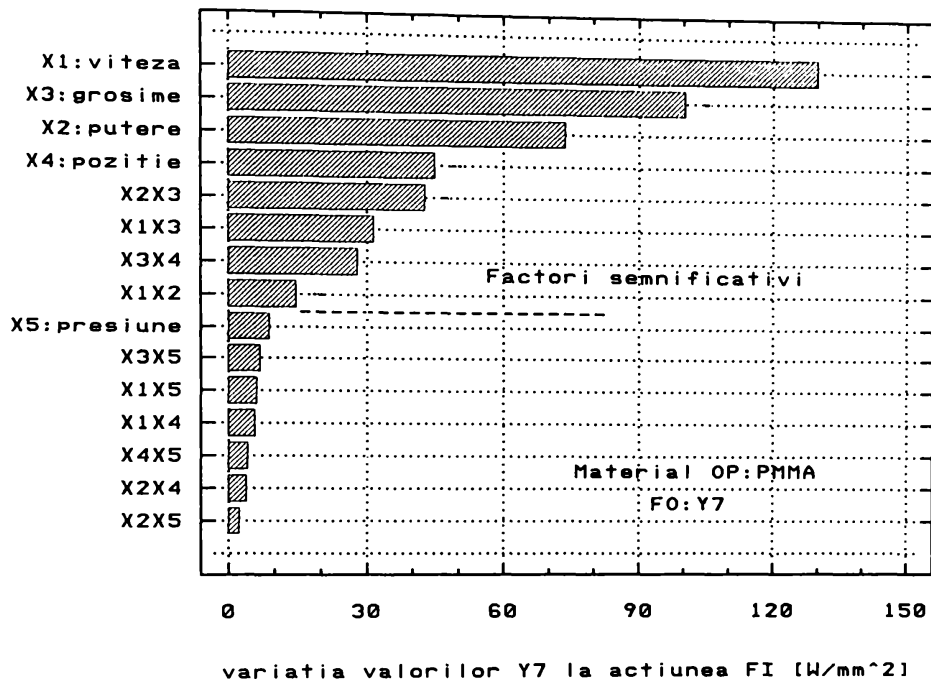


Fig. 4.18

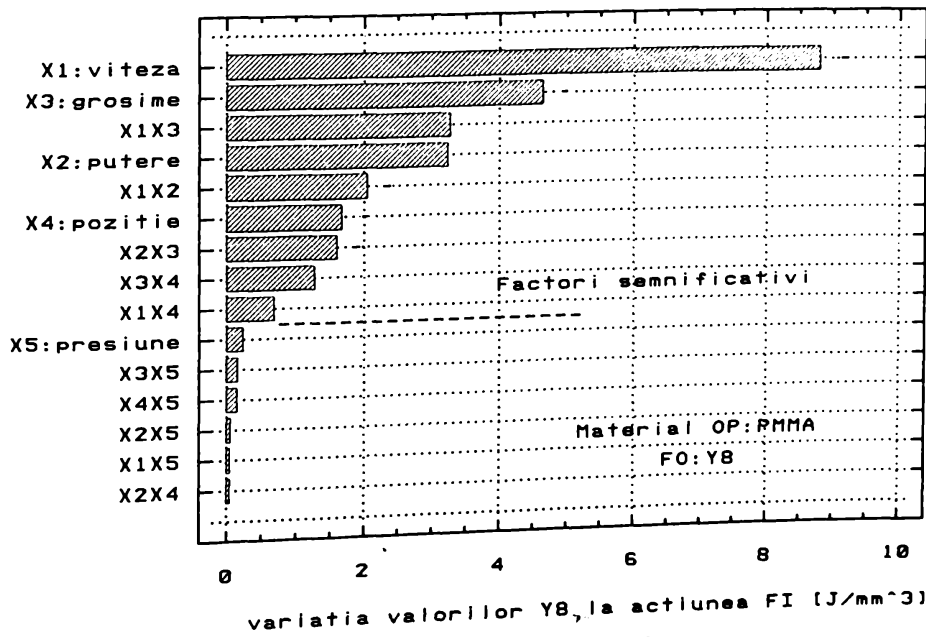


Fig. 4.19

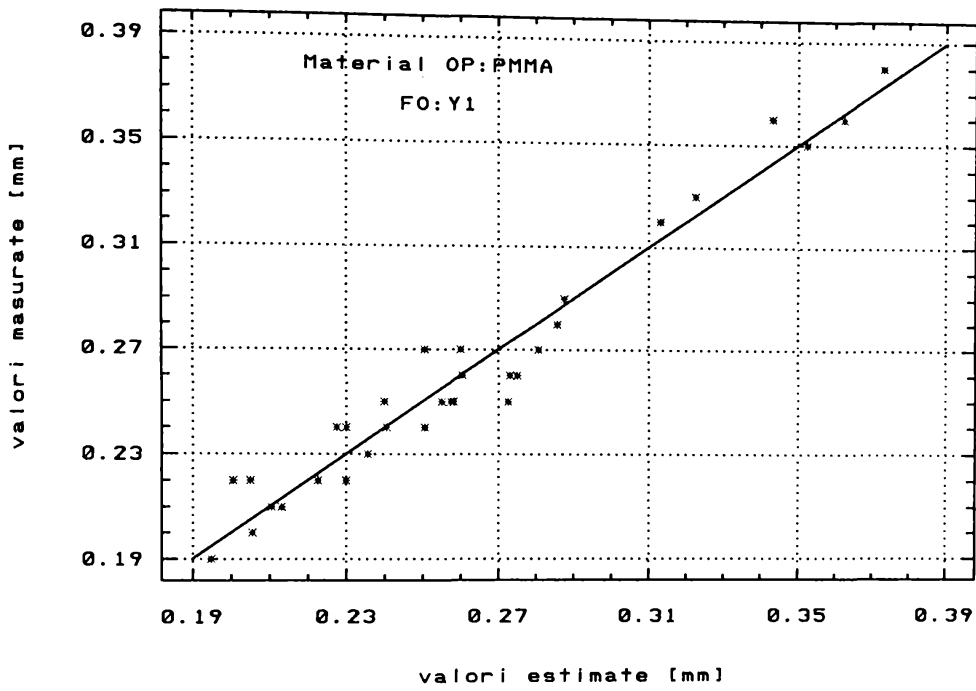


Fig. 4.20

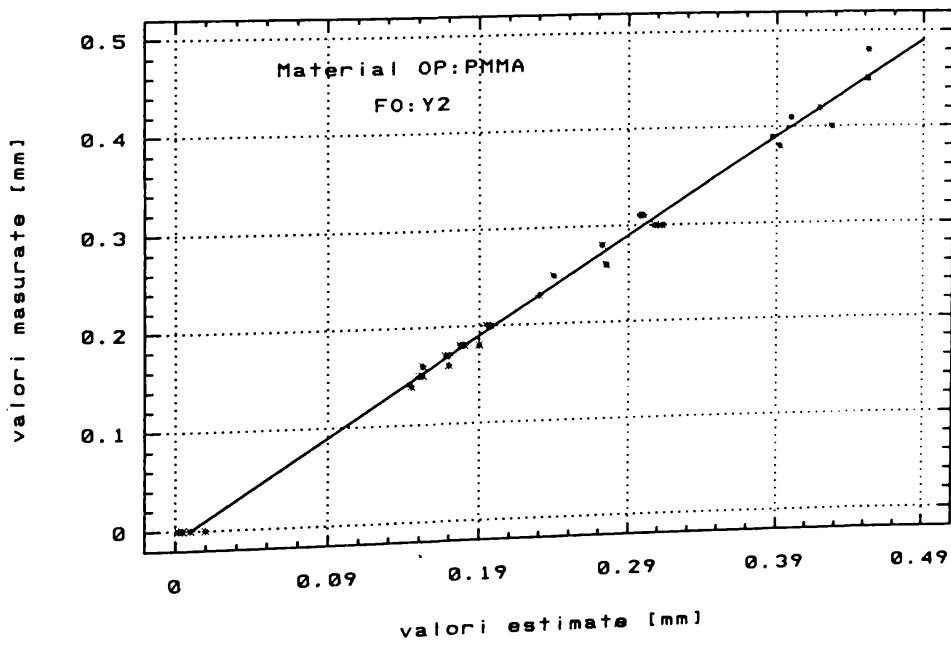


Fig. 4.21

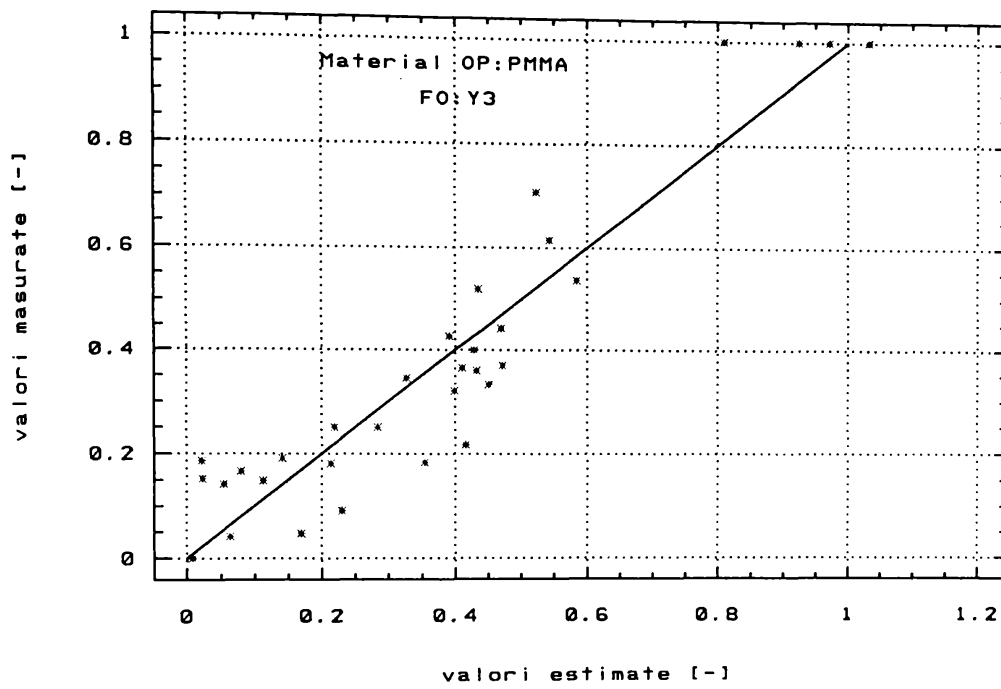


Fig. 4.22

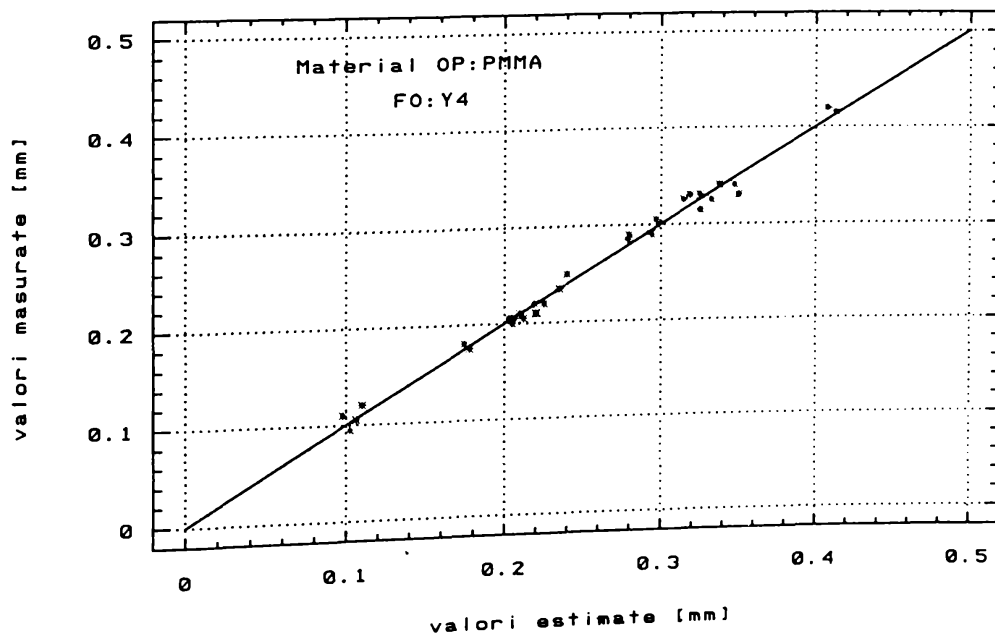


Fig. 4.23

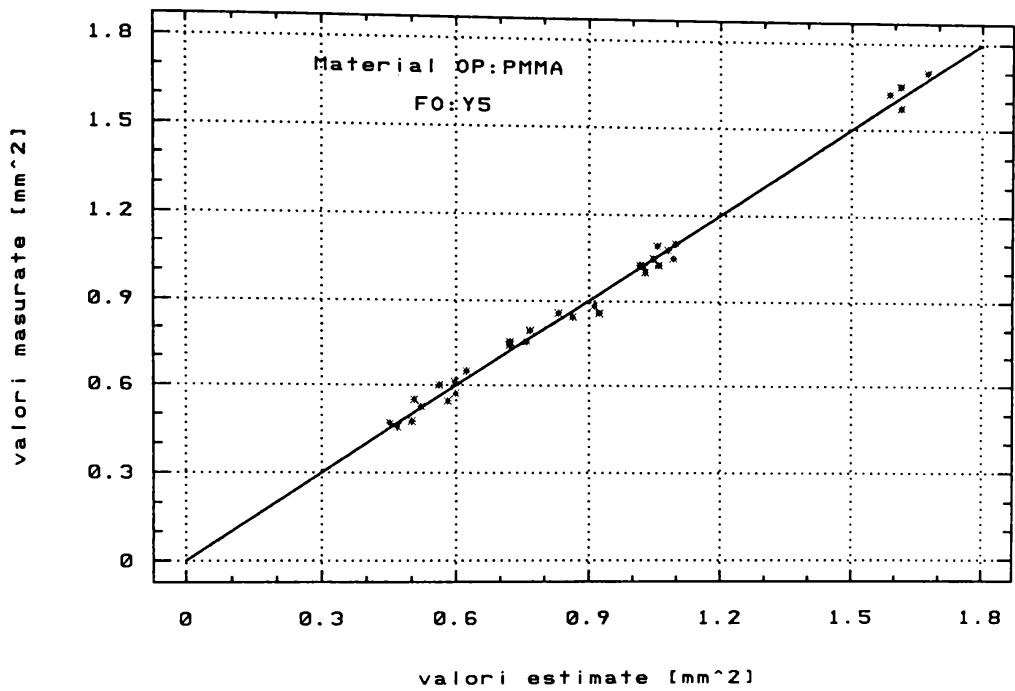


Fig. 4.24

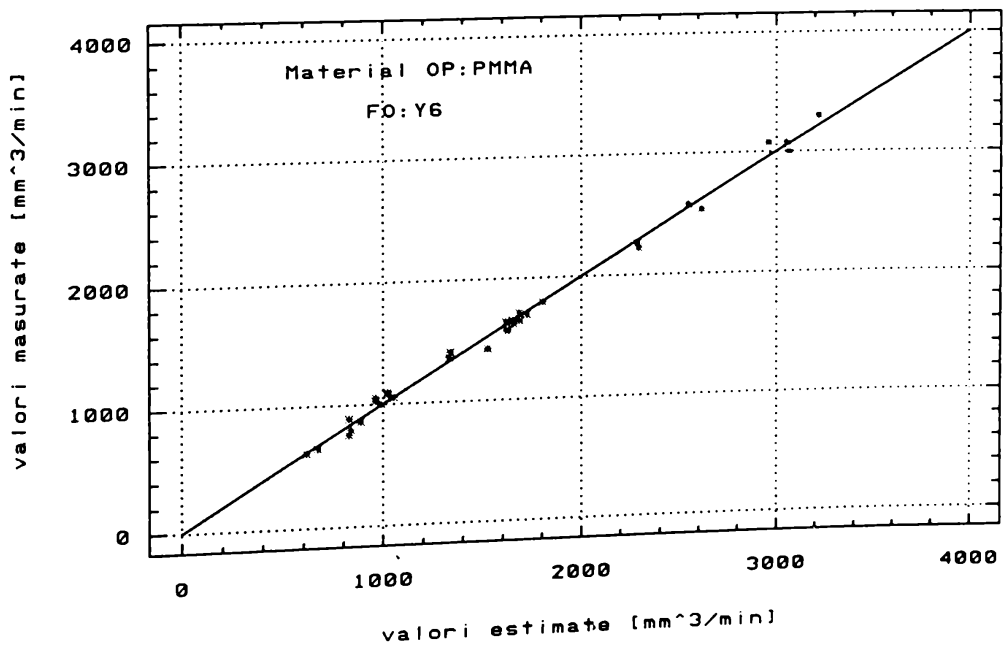


Fig. 4.25



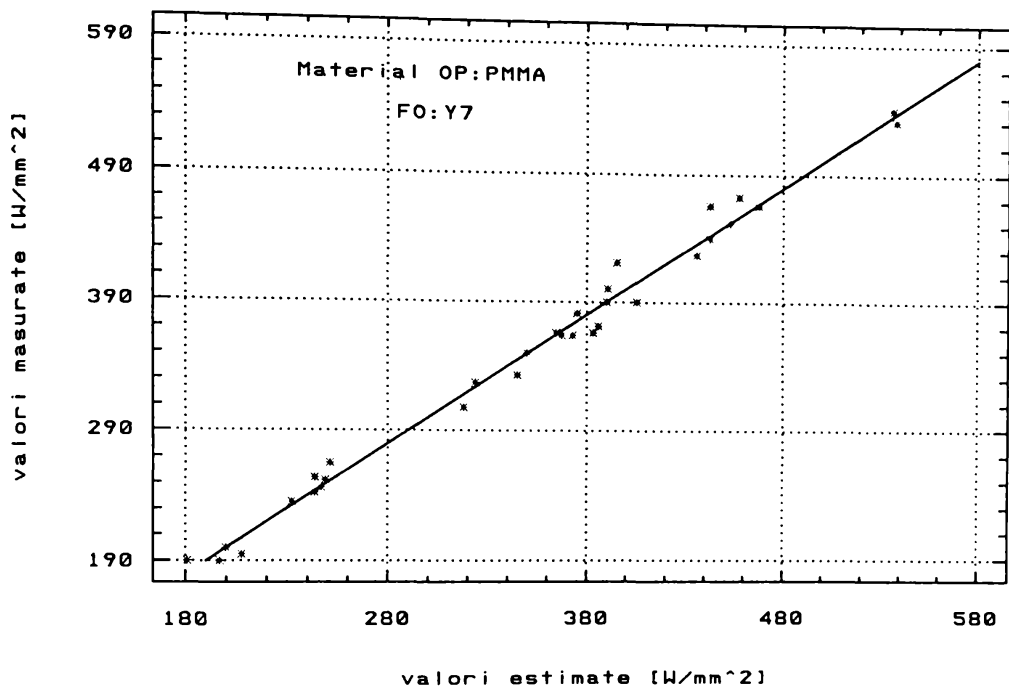


Fig. 4.26

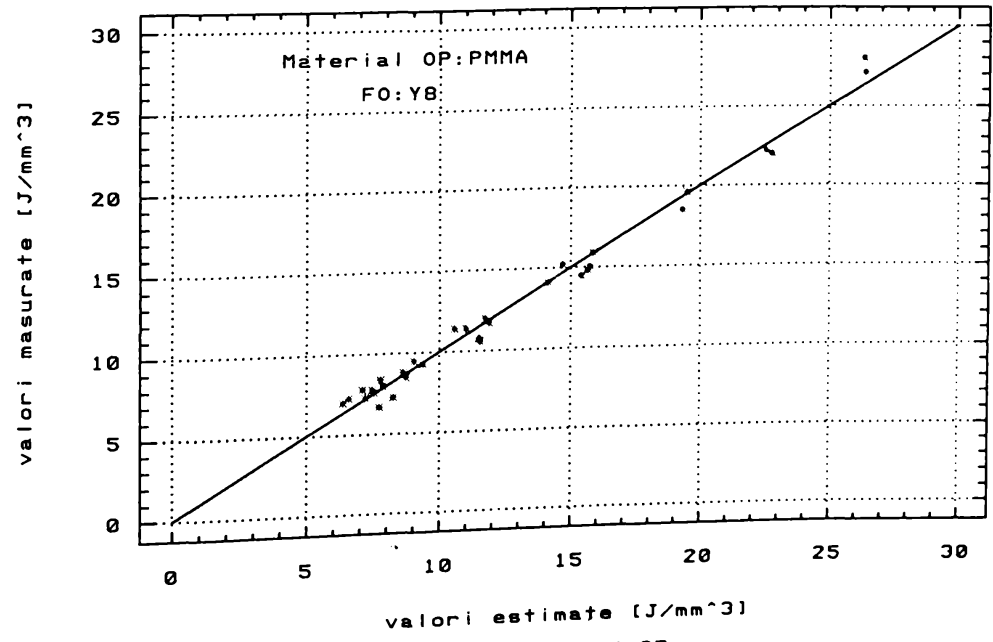


Fig. 4.27

f) dintre cele opt **FO** definite mai sus, trei au fost considerate de interes tehnologic deosebit, și anume:

- $Y_{F3}$  [ - ]  $\Rightarrow$  paralelismul pereților tăieturii;
- $Y_{F6}$  [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]  $\Rightarrow$  volumul de material erodat în unitatea de timp;
- $Y_{F8}$  [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]  $\Rightarrow$  energia laser consumată pentru erodarea unității de volum de material;

pentru aceste **FO** au fost trasate suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile între **FI** semnificativi grupați doi câte doi; în aceste reprezentări, **FI** ce nu apar sunt considerați fixați pe nivelul de bază (fig.4.28...fig.4.42).

Concluziile privind rezultatele modelării experimentale a **TL** a **PMMA** sunt prezentate în continuare.

#### 4.4.2.3 Concluzii și posibilități de optimizare

Analiza făcută în urma prelucrării datelor experimentale, sintetizată în tab.4.16 și tab.4.17, respectiv fig.4.12...fig.4.42, permite formularea următoarelor concluzii asupra **TL** a **PMMA**:

a) modelarea experimentală prin **EFC 2<sup>5</sup>** dă rezultate excepționale sub aspectul fidelității modelelor, rezultând precizii ale estimăției (concordanță între valorile măsurate și cele determinate cu ajutorul modelelor) de peste 98 % pentru toate **FO** (cu excepția lui  $Y_{F1} \rightarrow 92$  % și  $Y_{F3} \rightarrow 84$  %), modelele găsite putând fi folosite cu succes pentru aproximarea **FO** în spațiul multifactorial explorat astfel încât informația furnizată să poată fi efectiv utilizată în scop tehnologic.

b) **FI**  $X_{F5}$  (presiunea gazului de lucru) este nesemnificativ ca importanță pentru toate **FO**, cu excepția lui  $Y_{F1}$ , datorită condițiilor specifice de pe suprafața superioară a **OP**; se poate face deci afirmația că dacă se asigură presiunea minimă necesară evacuării materialului erodat, creșterea în continuare a presiunii gazului de lucru nu mai influențează semnificativ performanțele procesului de **TL**; evident că în această situație devin neglijabile și toate interacțiunile celorlalți **FI** cu  $X_{F5}$  (vezi tab.4.16 și tab.4.17);

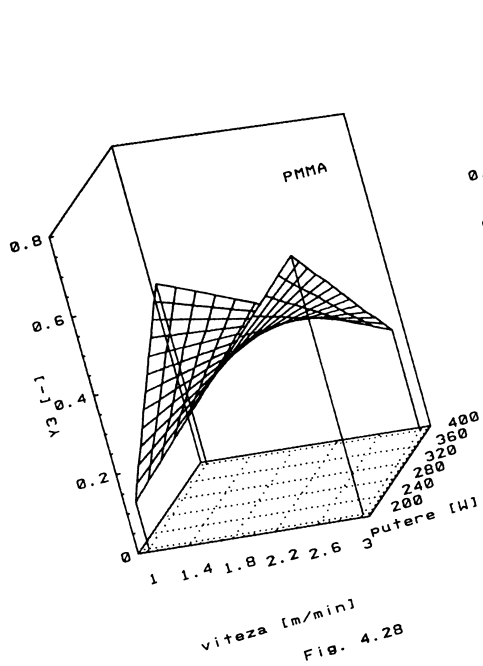


Fig. 4.28

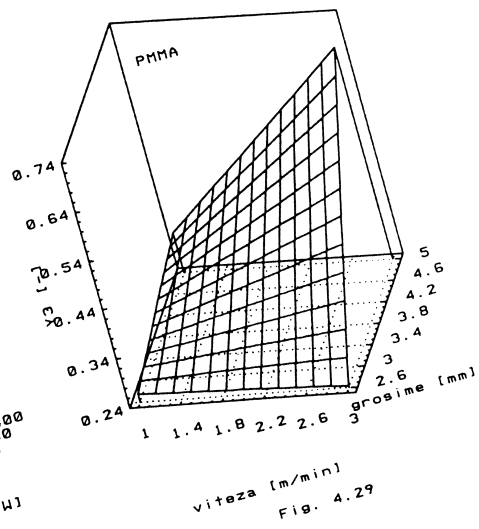


Fig. 4.29

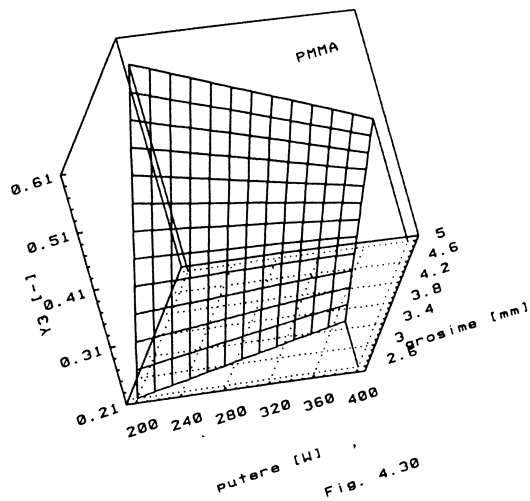


Fig. 4.30

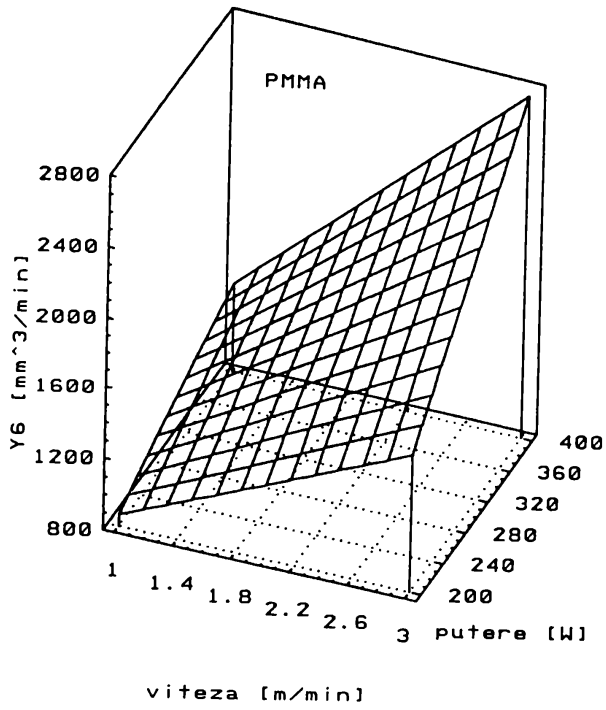


Fig. 4.31

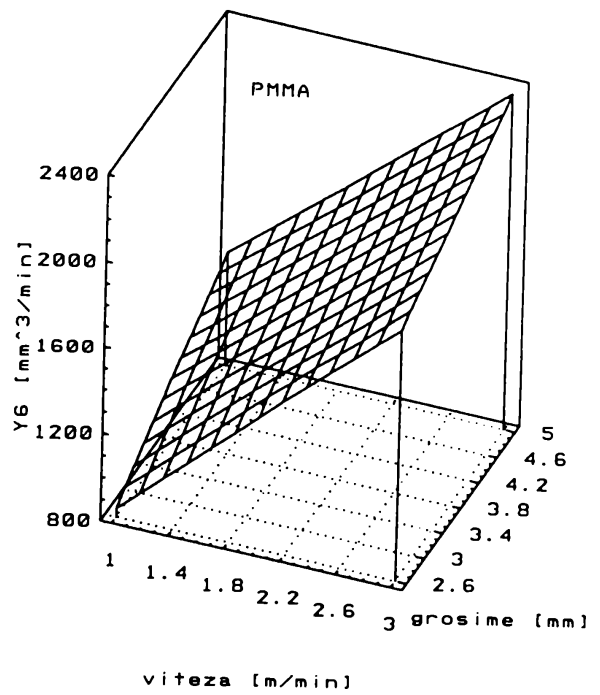


Fig. 4.32

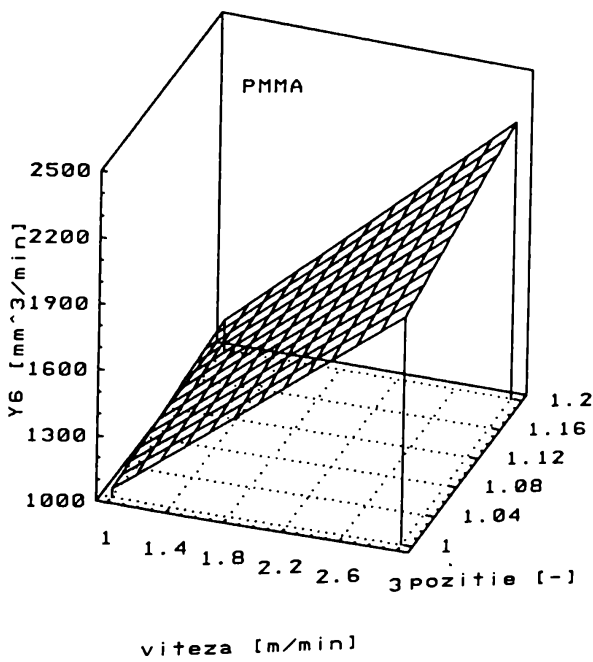


Fig. 4.33

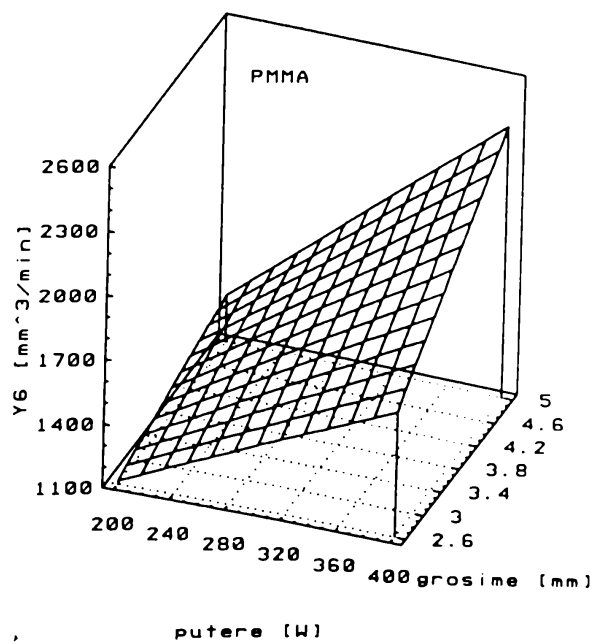


Fig. 4.34

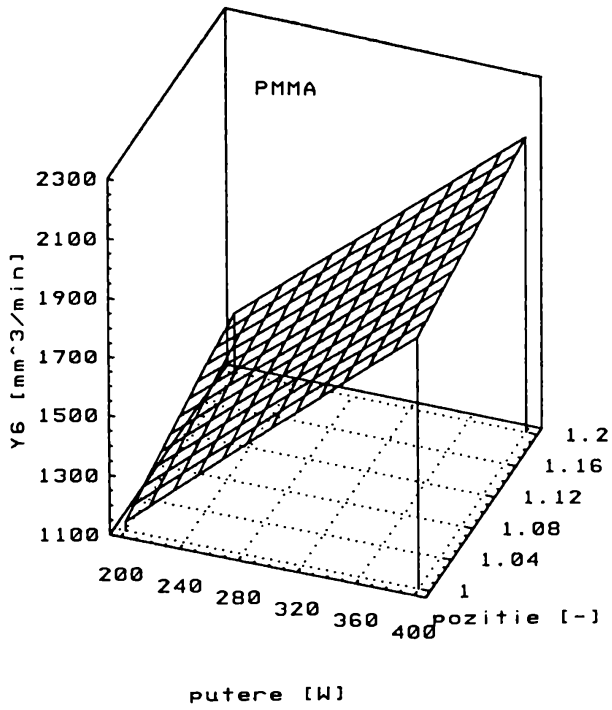


Fig. 4.35

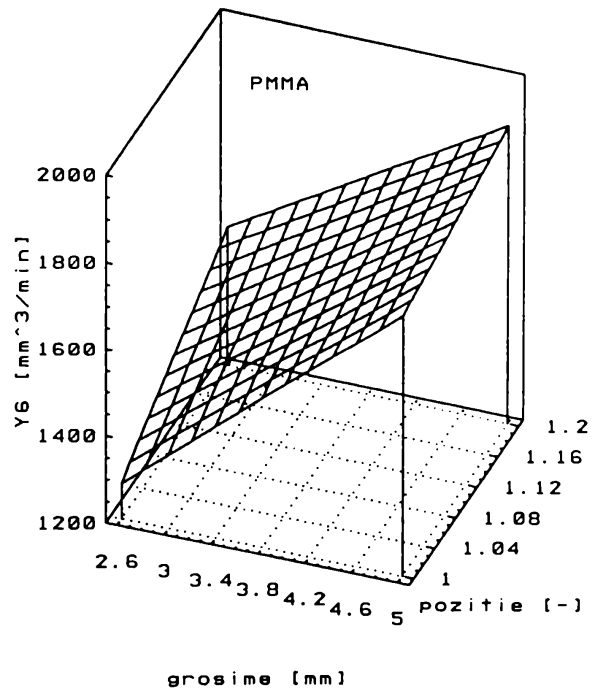


Fig. 4.36

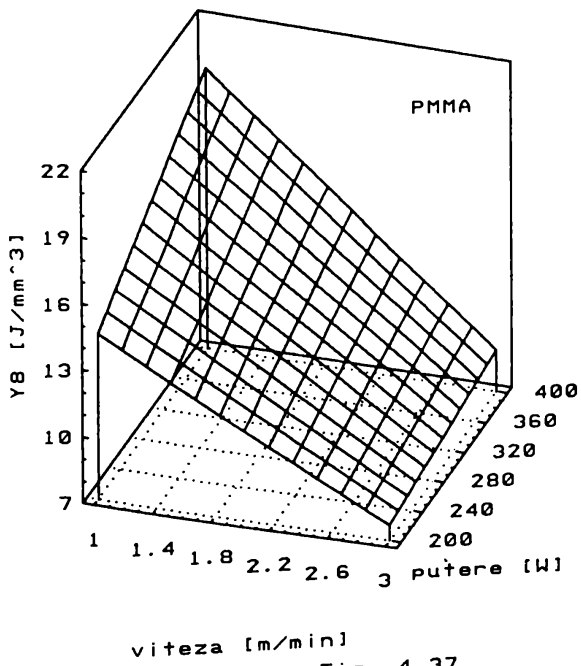


Fig. 4.37

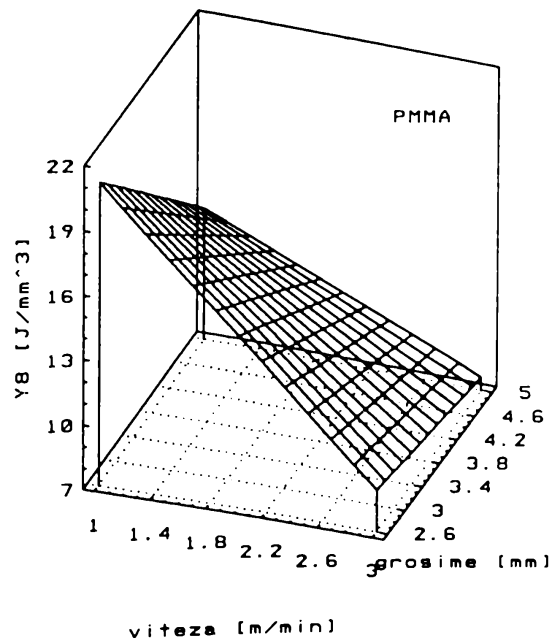


Fig. 4.38

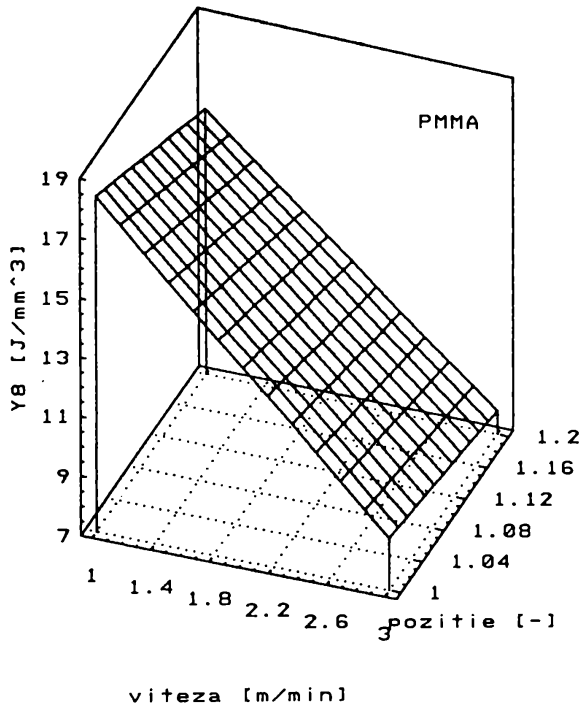


Fig. 4.39

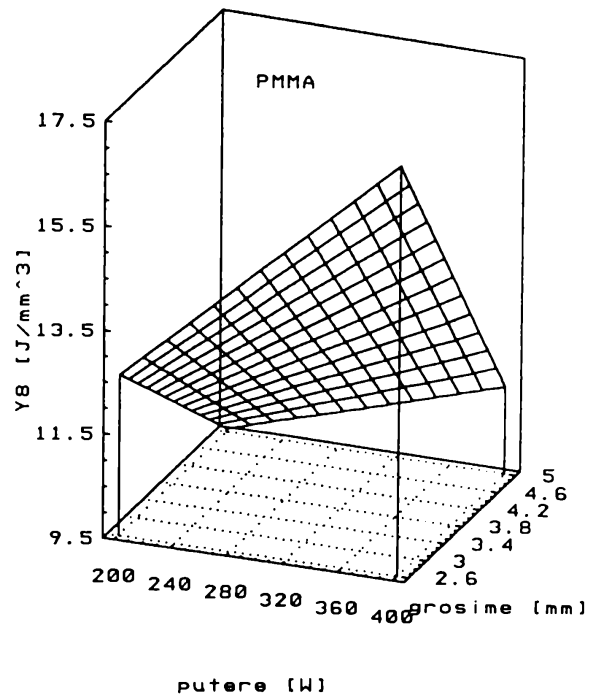


Fig. 4.40

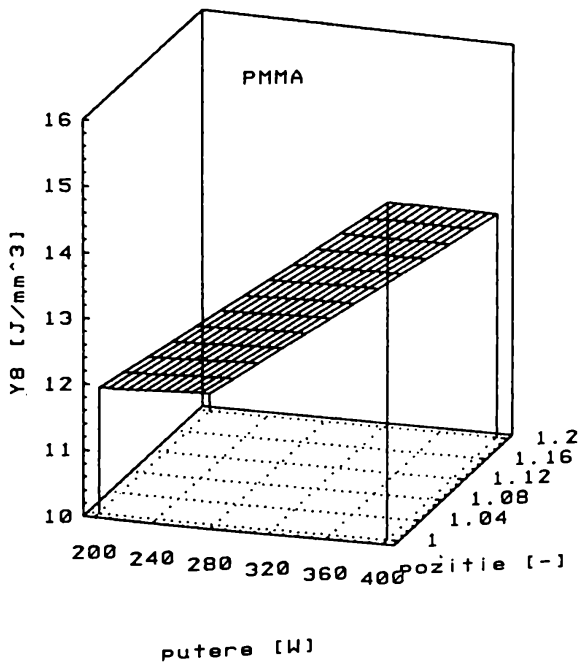


Fig. 4.41

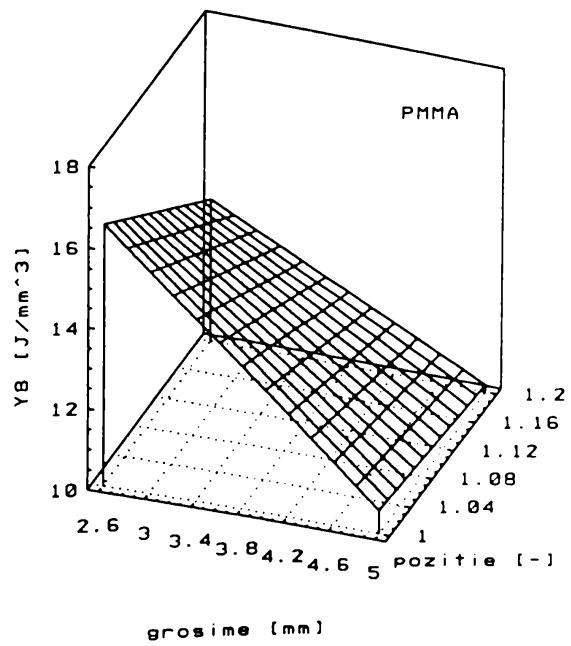


Fig. 4.42

c) pentru toate **FO** sunt de importanță majoră **FI**:

-  $X_{F1} \Rightarrow v$  [m/min],

-  $X_{F2} \Rightarrow P_L$  [W],

-  $X_{F3} \Rightarrow s$  [mm];

este important de remarcat că acești trei **FI** apar și în modelele analitice prezentate în paragraful 3.5;

d)  $X_{F4}$  (poziția **SL-OP**) influențează, în general semnificativ **FO**, alături de interacțiunea  $X_{F4}-X_{F3}$ , dar în mai mică măsură decât **FI** amintiți mai sus (cu excepția  $Y_{F1}$ );

e) dependențele funcționale între **FI** și **FO** rezultate din natura procesului de **TL** (vezi cap.2 și cap.3) nu presupun prin expresia lor matematică (funcții exponențiale, putere, liniare etc.) existența unor puncte de extrem (optim) clasice, având derivata nulă, în domeniul de existență și cu atât mai puțin în cel de interes tehnologic, explorat prin modelare experimentală (puteri laser, viteze de tăiere, grosimi ale **OP**), nefiind necesară deci recurgerea la programe experimentale de ordin superior: cu ajutorul modelelor găsite, este posibilă identificarea, valorilor optime pentru fiecare **FO**, adică a maximizării sau minimizării acesteia, funcție de opțiune;

f) în general, pentru identificarea punctelor sau zonelor de optim, trebuie utilizate ecuațiile regresionale găsite (prin înlocuirea coeficienților din tab.4.16 sau 4.17 în expresia (4.1) a ecuației de regresie); practic însă, această identificare se poate face cu mult mai ușor pe baza graficelor prezentate în fig.4.28...fig.4.42.

Pentru cazul celor trei **FO**,  $Y_{F3}$ ,  $Y_{F6}$  și  $Y_{F8}$ , sensurile de variație ale valorilor lor în vederea atingerii unor performanțe cât mai bune, ținând seama de modul de definire al acestor **FO**, trebuie să fie:

-  $Y_{F3} \Rightarrow$  **minimizare**, adică un paralelism al pereților tăieturii cât mai ridicat;

-  $Y_{F6} \Rightarrow$  **maximizare**, adică un volum de material erodat în unitatea de timp cât mai mare;

-  $Y_{F8} \Rightarrow$  **minimizare**, adică un consum energetic pe unitatea de volum de material erodat cât mai mic. ,

În acest context, pe baza analizei modelelor regresionale, a histogramelor efectelor, dar mai ales a suprafețelor de răspuns din fig.4.28...fig.4.42, se pot formula următoarele concluzii:

- atât consumul energetic pe unitatea de volum de material erodat ( $Y_{F8}$ ), cât și volumul de material erodat în unitatea de timp ( $Y_{F6}$ ) depind semnificativ de **FI**:

- $X_{F1} \Rightarrow v$  [m/min],
- $X_{F2} \Rightarrow P_L$  [W],
- $X_{F3} \Rightarrow s$  [mm],
- $X_{F4} \Rightarrow$  poziție **SL-OP** [-],

precum și de câteva interacțiuni ale acestor **FI**, între care este de remarcă interacțiunea viteză tăiere-putere laser ( $X_{F1}X_{F2}$ ); pentru ambele **FO**, viteza de tăiere este factor de primă importanță;

- **FI**  $X_{F1}$  și  $X_{F3}$  precum și interacțiunea  $X_{F1}X_{F2}$  se află printre **FI** semnificativi și în cazul **FO**  $Y_{F3}$ ;

- **FI**  $X_{F1}$  și  $X_{F3}$  acționează în sensuri diferite asupra **FO**  $Y_{F6}$  (direct proporționali) și respectiv  $Y_{F8}$  (invers proporționali);

Observațiile de mai sus au drept consecințe următoarele:

- dacă se urmărește cu prioritate creșterea volumului de material erodat în unitatea de timp, în condiții date, se recomandă ca **TL** să se realizeze în condițiile (în ordinea importanței):

- $v$  [m/min] ↑;
- $P_L$  [W] ↑;
- **SL** situat deasupra suprafeței **OP**;

- dacă se urmărește cu prioritate scăderea consumurilor energetice pe unitatea de volum de material erodat, se recomandă ca **TL** să se realizeze în condițiile (în ordinea importanței):

- $v$  [m/min] ↑;
- $P_L$  [W] ↓;
- **SL** situat deasupra suprafeței **OP**;

rezultate superioare se obțin în ambele cazuri pentru **OP** de grosimi ridicate.



Din compararea celor două grupe de cerințe, rezultă că se pot obține valori convenabile atât pentru valorile  $Y_{F6}$ , cât și  $Y_{F8}$ , dacă TL a PMMA se realizează cu viteze mari, asupra unor OP de grosime ridicată, cu SL poziționat deasupra suprafeței OP. În spațiul multifactorial explorat, aceasta se întâmplă pentru:

- $v = 3$  m/min;
- $s = 5$  mm;
- SL situat la 1 mm deasupra suprafeței OP:

profilul unei tăieturi care îndeplinește aceste condiții (poz.17 din tab.4.14) se observă în fig.4.43. Este de remarcă faptul că în acest caz, FO au valorile:

- $Y_{F6} = 3300$  mm<sup>3</sup>/min (față de o medie a măsurărilor de 1625 mm<sup>3</sup>/min);
- $Y_{F8} = 7,3$  J/mm<sup>3</sup> (față de o medie a măsurărilor de 12.7 J/mm<sup>3</sup>);

paralelismul pereților acestei tăieturi este însă relativ scăzut:  $Y_{F3} = 0.49$ , adică mai slab decât valoarea medie a măsurărilor, care este 0.375.

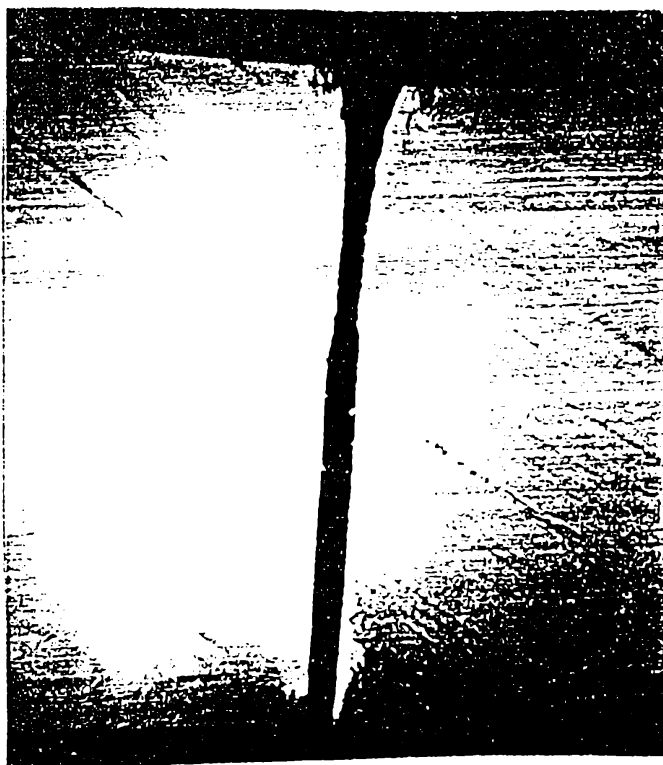


Fig. 4.43

În situația în care se urmărește cu prioritate obținerea unui paralelism cât mai ridicat al pereților tăieturii, se recomandă TL a unor OP având grosimi mici și utilizarea unor viteze de tăiere și a unor puteri laser scăzute. În spațiul multifactorial explorat, aceasta se realizează pentru:

- $v = 1 \text{ m/min}$ ;
- $s = 2,6 \text{ mm}$ ;
- $P_L = 200 \text{ W}$ ;

profilul unei tăieturi care îndeplinește aceste condiții (poz.16 din tab.4.14) se observă în fig.4.44. Este de remarcat faptul că în acest caz valorile **FO** sunt:

- $Y_{F3} = 0 \text{ [-]} (B = b = 0,25 \text{ mm})$ ;
- $Y_{F6} = 650 \text{ mm}^3/\text{min}$ ;
- $Y_{F8} = 18,5 \text{ J/mm}^3$ .

deci, în cazul  $Y_{F6}$  și  $Y_{F8}$ , performanțele sunt mult sub valorile medii.

Din analiza de mai sus, rezultă că la TL a PMMA, productivitatea și consumul energetic pe de o parte și calitatea tăieturilor, pe de altă parte, sunt obiective care se exclud reciproc.

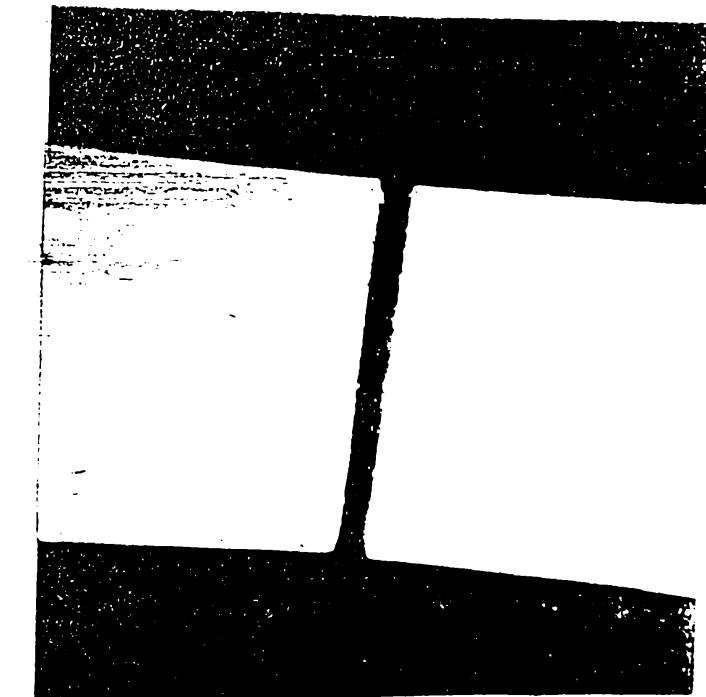


Fig. 4.44

### 4.4.3 Modelarea tăierii laser a OL. Experimentul 4

#### 4.4.3.1 Proiectarea si realizarea experimentului

Ca si în cazul TL a PMMA (vezi paragraful 4.4.2.1), proiectarea si realizarea experimentului presupune parcurgerea etapelor a) si b) prezentate în paragraful 4.4.1:

a) Coordonatele punctului central al experimentului, valorile nivelelor superior si inferior precum si intervalele de variație pentru fiecare FI,  $X_{F1}...X_{F5}$  au fost alese (pe baza modelării analitice, a informațiilor apriorice [49],[61],[87],[93],[99], precum si ca urmare a experienței acumulate în laboratorul de laseri CALFA-Béthune) în domeniul de valabilitate al ierarhizării FI si apar în tab.4.18.

Valori factori de influență la TL a OL

Tabela 4.18

Parametru	Cod	Valori fizice				
		$X_{F1}$ [m/min]	$X_{F2}$ [W]	$X_{F3}$ [mm]	$X_{F4}$ [-]	$X_{F5}$ [bar]
Nivel superior	+1	3	1200	1,7	1,2	3
Nivel inferior	-1	1	800	1,0	1,0	1
Punct central	0	2	1000	1,35	1,1	2
Interval de variație	$\Delta I$	1	200	0,35	0,1	1

b) Matricea-program a experimentului are aceeași structură ca si cea utilizată la modelarea TL a PMMA, fiind specifică EFC 2<sup>5</sup>. Această matrice-program, alături de valorile măsurate ale FO  $Y_{F1}$  si  $Y_{F2}$  apar în tab.4.19.

Tăieturile si măsurările au fost realizate în aceleași condiții ca si cele precizate în paragraful 4.4.2.1. Valorile FO  $Y_{F3}...Y_{F8}$ , calculate pe baza relațiilor de definiție date în paragraful 4.4.1, apar în tab.4.20. Programul sursă al comenzii numerice a utilajului în vederea realizării tăieturilor conform ordinii impusă de matricea-program si reprezentată în fig.4.45, este dat în anexa 4.

Matricea-program a experimentului EFC 2<sup>5</sup> de TL a OL

Tabela 4.19

Nr. crt.	Valori codificate nivele FI					Valori măsurate FO	
	X <sub>F1</sub>	X <sub>F2</sub>	X <sub>F3</sub>	X <sub>F4</sub>	X <sub>F5</sub>	Y <sub>F1</sub>	Y <sub>F2</sub>
1	+1	+1	+1	+1	+1	0,28	0,20
2	-1	+1	+1	+1	+1	0,33	0,35
3	+1	-1	+1	+1	+1	0,37	0,29
4	-1	-1	+1	+1	+1	0,29	0,26
5	+1	+1	-1	+1	+1	0,27	0,24
6	-1	+1	-1	+1	+1	0,48	0,42
7	+1	-1	-1	+1	+1	0,27	0,22
8	-1	-1	-1	+1	+1	0,33	0,21
9	+1	+1	+1	-1	+1	0,38	0,23
10	-1	+1	+1	-1	+1	0,41	0,26
11	+1	-1	+1	-1	+1	0,35	0,19
12	-1	-1	+1	-1	+1	0,38	0,23
13	+1	+1	-1	-1	+1	0,38	0,23
14	-1	+1	-1	-1	+1	0,47	0,29
15	+1	-1	-1	-1	+1	0,36	0,23
16	-1	-1	-1	-1	+1	0,42	0,26
17	+1	+1	+1	+1	-1	0,28	0,23
18	-1	+1	+1	+1	-1	0,33	0,20
19	+1	-1	+1	+1	-1	0,28	0,22
20	-1	-1	+1	+1	-1	0,33	0,26
21	+1	+1	-1	+1	-1	0,30	0,24
22	-1	+1	-1	+1	-1	0,34	0,30
23	+1	-1	-1	+1	-1	0,28	0,22
24	-1	-1	-1	+1	-1	0,32	0,28
25	+1	+1	+1	-1	-1	0,33	0,24
26	-1	+1	+1	-1	-1	0,38	0,30
27	+1	-1	+1	-1	-1	0,29	0,20
28	-1	-1	+1	-1	-1	0,34	0,27
29	+1	+1	-1	-1	-1	0,37	0,25
30	-1	+1	-1	-1	-1	0,38	0,27
31	+1	-1	-1	-1	-1	0,30	0,20
32	-1	-1	-1	-1	-1	0,40	0,27

Valori ale FO rezultate pe baza măsurărilor la TL a OL

Tabela 4.20

Nr. crt.	Funcții obiectiv					
	$Y_{F3}$ [-]	$Y_{F4}$ [mm]	$Y_{F5}$ [mm <sup>2</sup> ]	$Y_{F6}$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Y_{F7}$ [W/mm <sup>2</sup> ]	$Y_{F8}$ [J/mm <sup>3</sup> ]
1	0,286	0,240	0,408	1224	2941	58.8
2	0,061	0,340	0,578	578	2076	124.6
3	0,216	0,330	0,561	1683	1426	28.5
4	0,103	0,275	0,468	468	1709	102.6
5	0,111	0,255	0,255	765	4706	94.1
6	0,067	0,450	0,450	450	2667	160.0
7	0,185	0,245	0,245	735	3265	65.3
8	0,364	0,270	0,270	270	2963	177.8
9	0,395	0,305	0,519	1557	2312	46.2
10	0,366	0,335	0,570	570	2105	126.3
11	0,457	0,270	0,459	1377	1743	34.9
12	0,395	0,305	0,519	519	1541	92.5
13	0,395	0,305	0,305	915	3934	78.7
14	0,383	0,380	0,380	380	3158	189.5
15	0,361	0,295	0,295	885	2712	54.2
16	0,381	0,340	0,340	340	2353	141.2
17	0,179	0,255	0,434	1302	2765	55.3
18	0,394	0,265	0,451	451	2661	159.6
19	0,214	0,250	0,425	1275	1882	37.6
20	0,212	0,295	0,502	502	1594	95.6
21	0,200	0,270	0,270	810	4444	88.9
22	0,118	0,320	0,320	320	3750	225.0
23	0,214	0,250	0,250	750	3200	64.0
24	0,125	0,300	0,300	300	2667	160.0
25	0,273	0,285	0,485	1455	2474	49.5
26	0,211	0,340	0,578	578	2076	124.6
27	0,310	0,245	0,417	1251	1919	38.4
28	0,206	0,305	0,519	519	1541	92.5
29	0,324	0,310	0,310	930	3871	77.4
30	0,289	0,325	0,325	325	3692	221.5
31	0,333	0,250	0,250	750	3200	64.0
32	0,325	0,335	0,335	335	2388	143.3

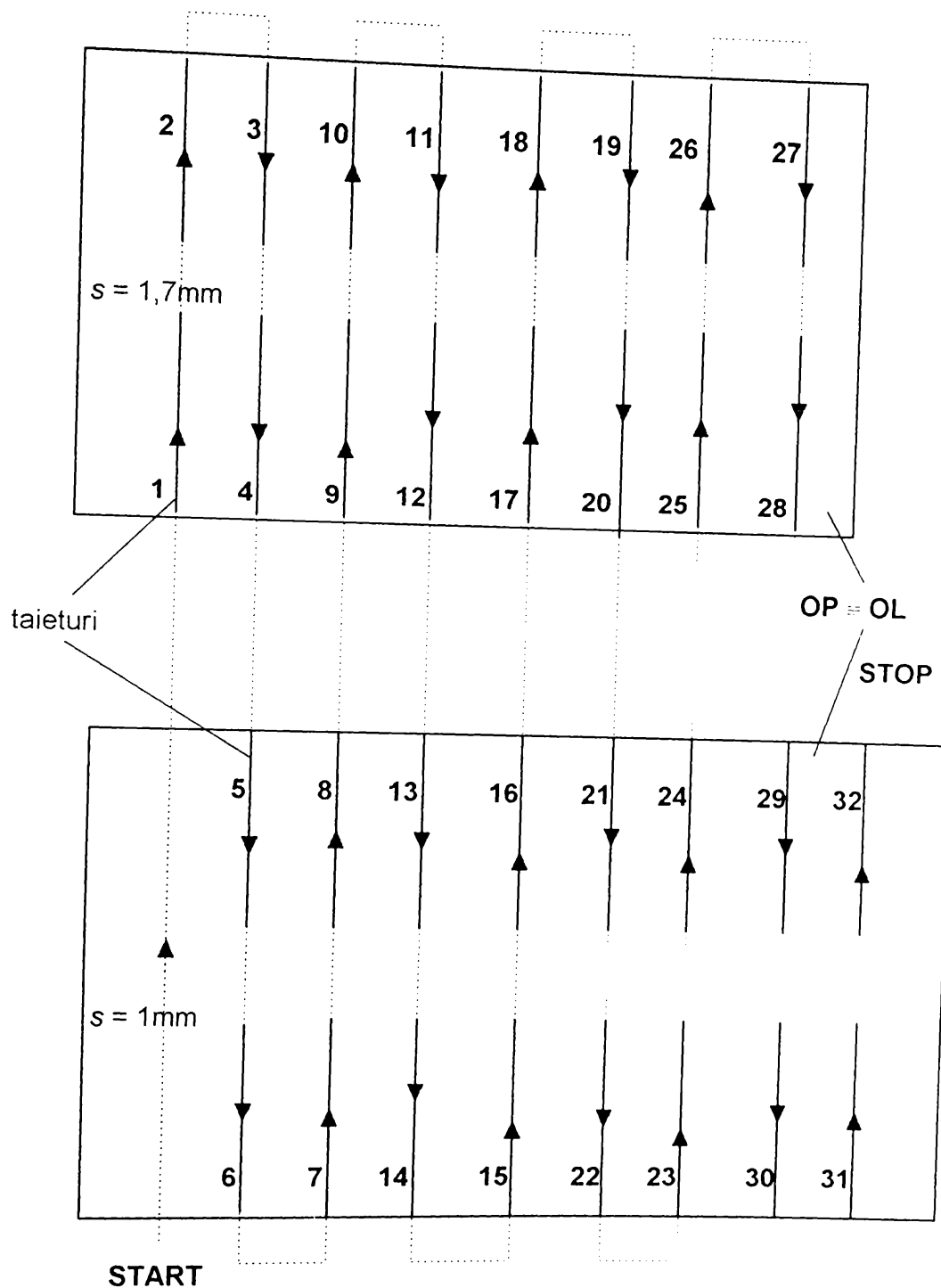


Fig.4.45

#### 4.5.3.2 Prelucrarea rezultatelor măsurărilor

Este similară ca structură cu prelucrarea datelor experimentale de la TL a PMMA prezentată în paragraful 4.4.2.2, fiind realizată cu ajutorul programului STATGRAPHICS. În urma prelucrării datelor, au rezultat:

- a) FI si interacțiunile de ordinul I semnificative (tab.4.21 si tab.4.22):

b) coeficienții modelelor experimentale căutate pentru valori codificate ale **FI** (tab.4.21) și respectiv pentru valori fizice ale **FI** (tab.4.22); forma relațiilor regresionale este cea dată de relația (4.1);

c) precizia de estimare a modelelor regresionale, pe baza coeficientului  $R^2$  [131], pentru un prag de semnificație  $\alpha_s = 0,05$  (tab.4.21 și tab.4.22):

**Coeficienții și precizia de estimare ale modelelor experimentale obținute la TL a OL cu FI având valori codificate**

Tabela 4.21

Coefi- cient	Valori ale coeficienților modelelor experimentale pentru FO $Y_{Fi}$							
	$Y_{F1}$	$Y_{F2}$	$Y_{F3}$	$Y_{F4}$	$Y_{F5}$	$Y_{F6}$	$Y_{F7}$	$Y_{F8}$
$b_{0j}$	0,34094	0,25438	0,24913	0,29766	0,39959	766,531	2674,200	102,031
$b_{1j}$	-0,02594	-0,02562	0,01487	-0,02578	-0,03272	334,219	246,997	-43,606
$b_{2j}$	0,01219	0,01312	-0,00881	0,01266	0,01603	nesemnif.	426,116	15,800
$b_{3j}$	-0,00969	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	0,09522	189,656	-643,972	-23,725
$b_{4j}$	-0,03031	0,00938	-0,08863	-0,01047	-0,01328	nesemnif.	110,422	nesemnif.
$b_{5j}$	0,01281	0,00438	0,01318	0,00859	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{12j}$	nesemnif.	-0,00562	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	-6,038
$b_{13j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	93,594	-101,447	8,825
$b_{14j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{15j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{23j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{24j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{25j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{34j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{35j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{45j}$	-0,00969	0,00937	-0,04069	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
Preci- zie es- timație	82,37 [%]	69,50 [%]	87,00 [%]	69,84 [%]	93,28 [%]	96,63 [%]	93,64 [%]	96,85 [%]

Au fost realizate, pentru fiecare FO, următoarele reprezentări grafice:

d) histograma efectelor (fig.4.46...fig.4.53):

e) compararea valorilor măsurate cu cele estimate cu ajutorul modelelor polinomiale găsite (fig.4.54...fig.4.61):

**Coeficienții și precizia de estimare ale modelelor experimentale  
obținute la TL a OL cu FI având valori fizice**

Tabela 4.22

Coefi- cient	Valori ale coeficienților modelelor experimentale pentru FO $Y_{Fj}$							
	$Y_{F1}$	$Y_{F2}$	$Y_{F3}$	$Y_{F4}$	$Y_{F5}$	$Y_{F6}$	$Y_{F7}$	$Y_{F8}$
$b_{0j}$	0,463929	0,278125	0,316813	0,383906	0,163696	88,5714	536,286	209,458
$b_{1j}$	-0,02594	0,002500	0,014875	-0,02578	-0,03272	-26,7857	638,292	-47,458
$b_{2j}$	0,000061	0,000122	-0,00004	0,000063	0,00008	nesemnif.	2,13058	0,139375
$b_{3j}$	-0,02768	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	0,272054	7,0536	-1260,22	-118,214
$b_{4j}$	-0,10938	-0,09375	-0,07250	-0,10469	-0,13281	nesemnif.	1104,22	nesemnif.
$b_{5j}$	0,119375	-0,09875	0,46075	0,008594	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{12j}$	nesemnif.	-0,00003	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	-0,03019
$b_{13j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	267,411	-289,848	25,2143
$b_{14j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{15j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{23j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{24j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{25j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{34j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{35j}$	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
$b_{45j}$	-0,09687	0,093750	-0,40687	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.	nesemnif.
Preci- zie es- timație	82,37 [%]	69,50 [%]	87,00 [%]	69,84 [%]	93,28 [%]	96,63 [%]	93,64 [%]	96,85 [%]

f) dintre cele opt FO definite mai sus, ca și la TL a PMMA, trei au fost considerate de interes tehnologic deosebit, și anume:

- $Y_{F3}$  [ - ]  $\Rightarrow$  paralelismul pereților tăieturii;
- $Y_{F6}$  [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]  $\Rightarrow$  volumul de material erodat în unitatea de timp;
- $Y_{F8}$  [ $\text{J}/\text{mm}^3$ ]  $\Rightarrow$  energia laser consumată pentru erodarea unității de volum de material;

pentru aceste FO au fost trasate suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile între FI semnificativi grupați doi câte doi; în aceste reprezentări, FI ce nu apar sunt considerați fixați pe nivelul de bază (fig.4.62...fig.4.71).

Pe baza informațiilor furnizate de etapele a)...f) au putut fi formulate concluziile privind rezultatele modelării experimentale a TL a OL.



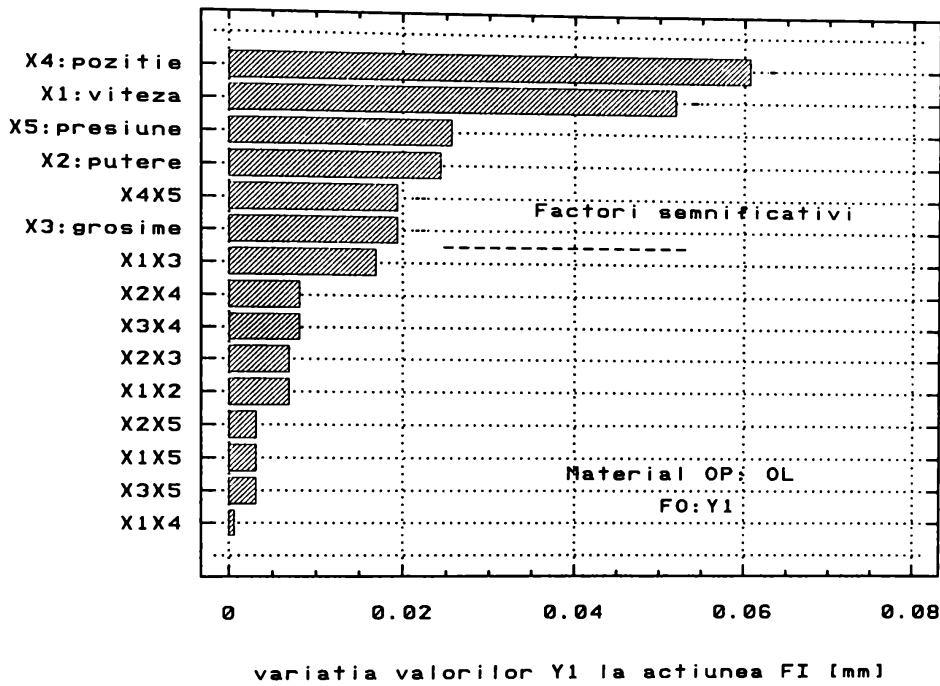


Fig. 4.46

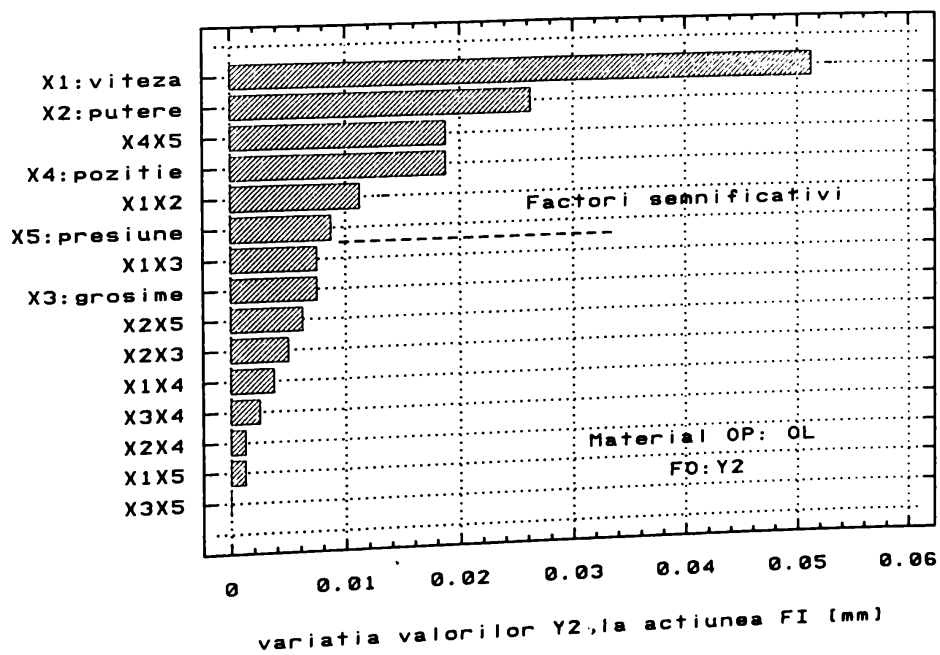


Fig. 4.47

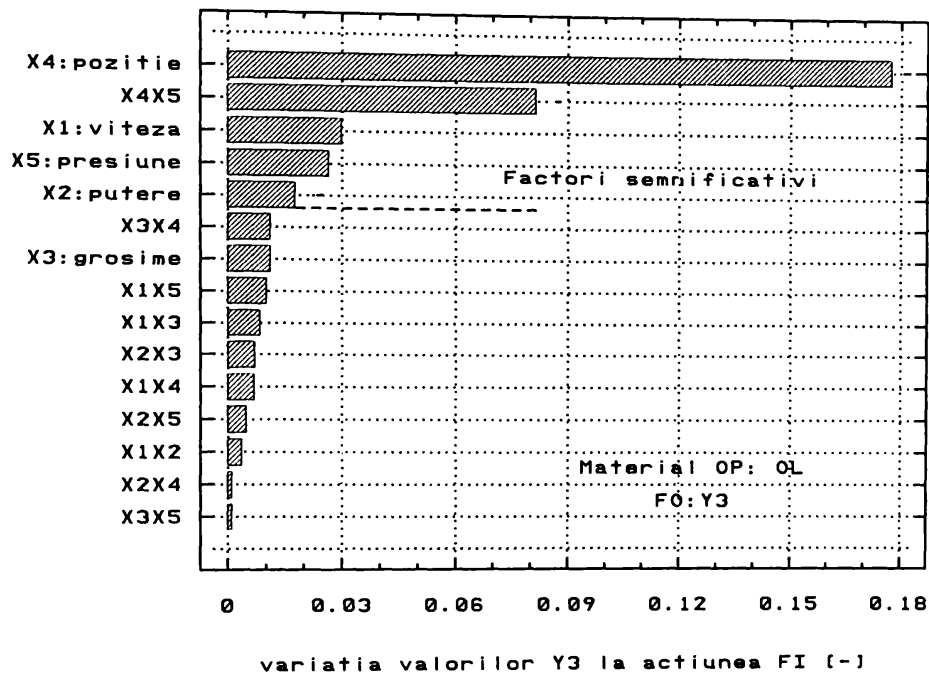


Fig. 4.48

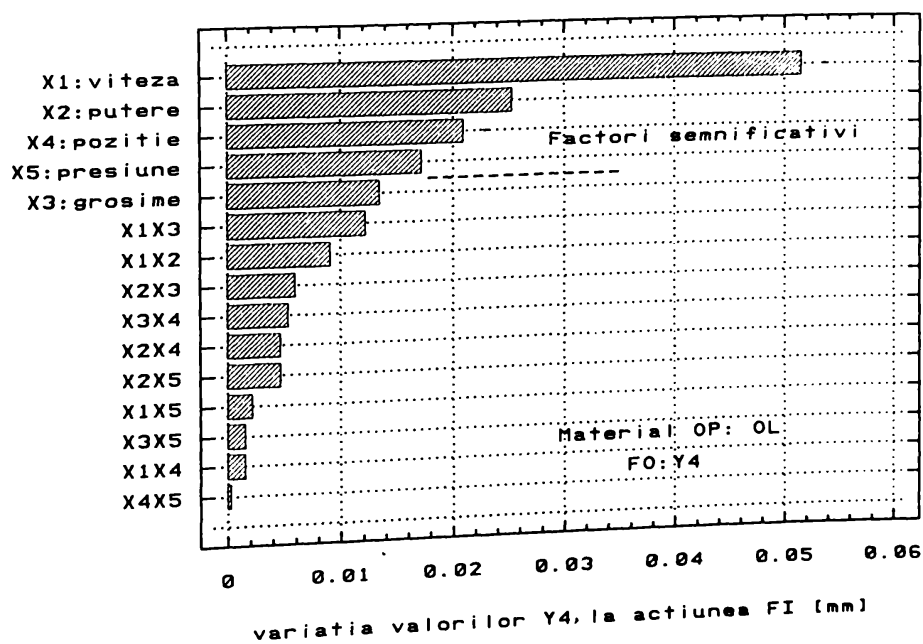


Fig. 4.49

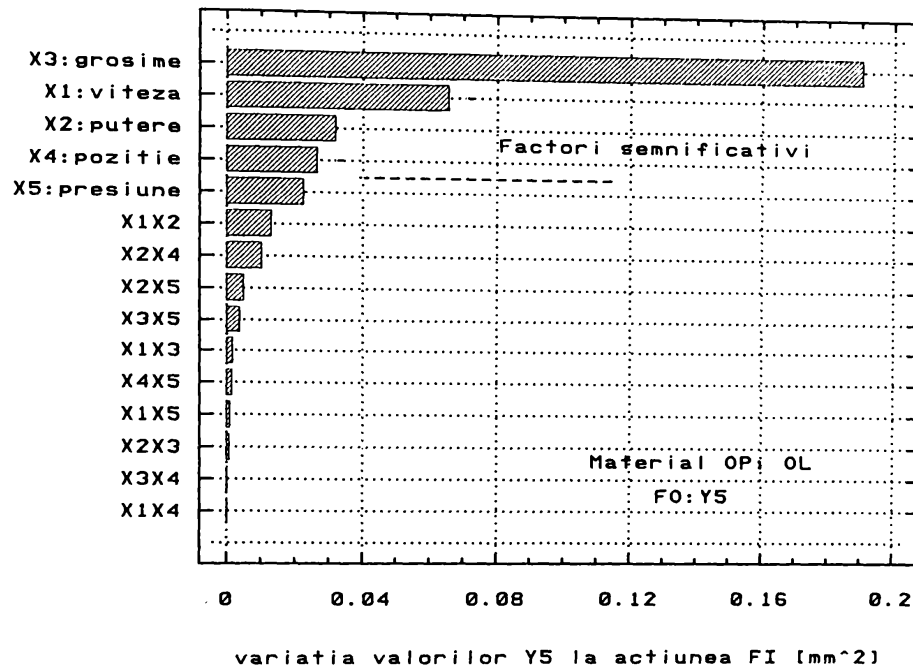


Fig. 4.50

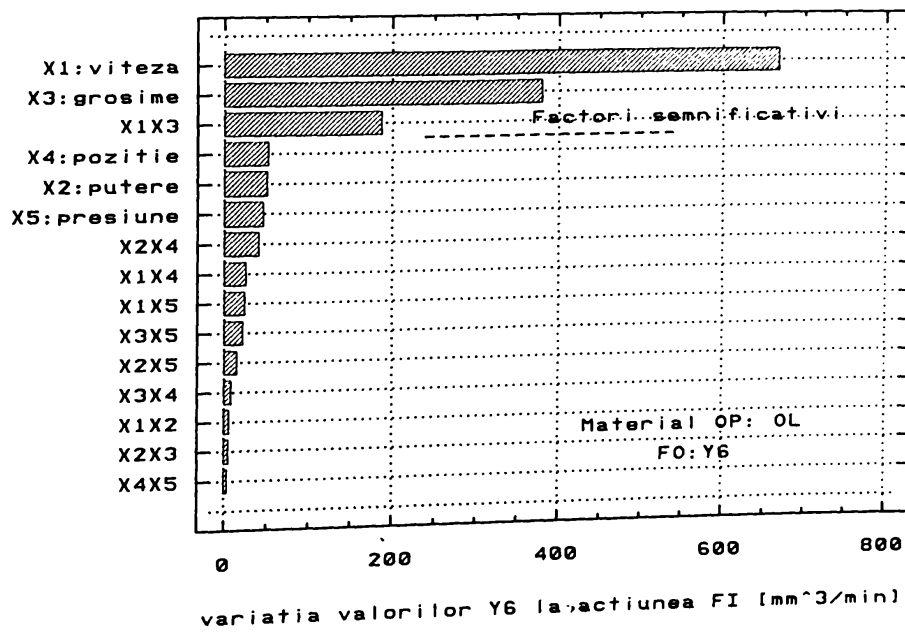


Fig. 4.51

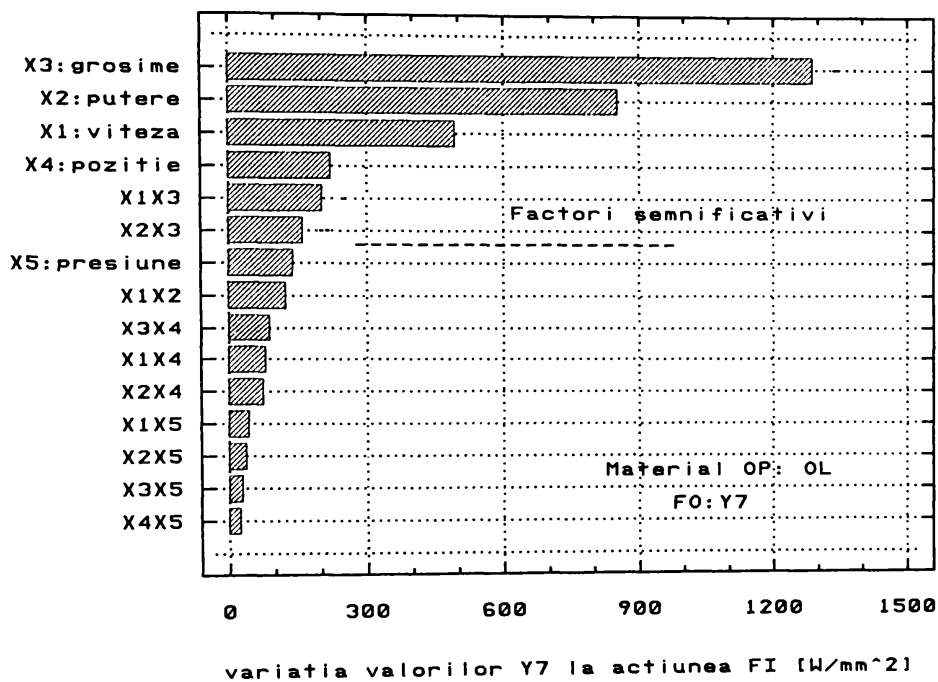


Fig. 4.52

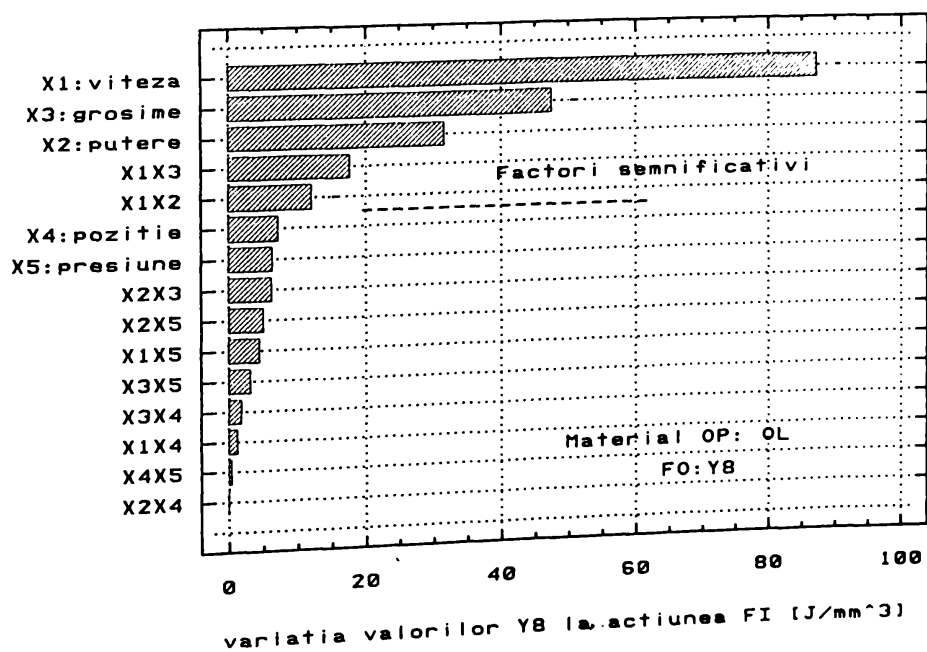


Fig. 4.53

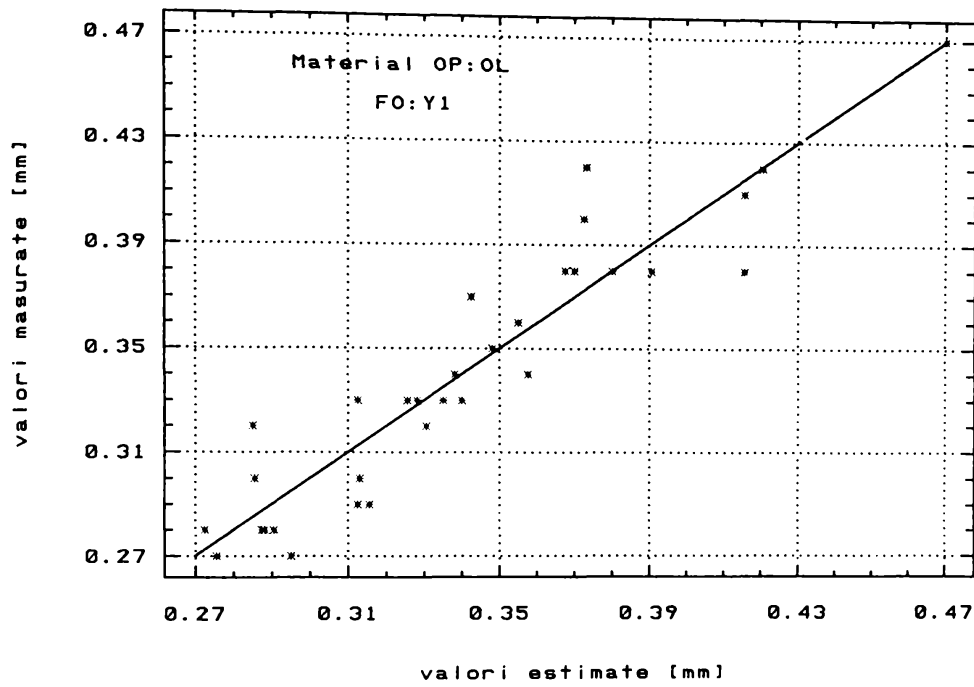


Fig. 4.54

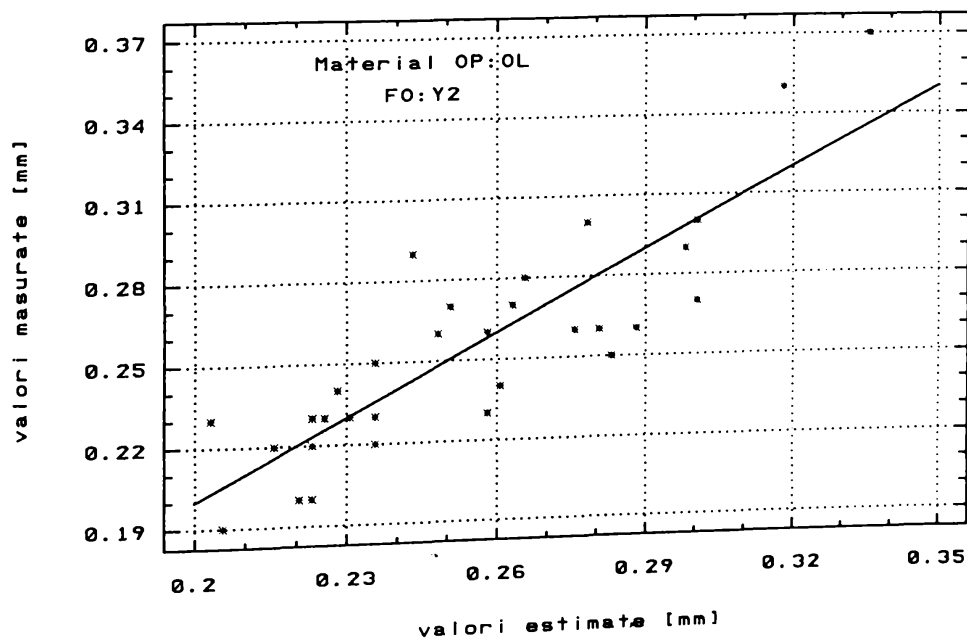


Fig. 4.55

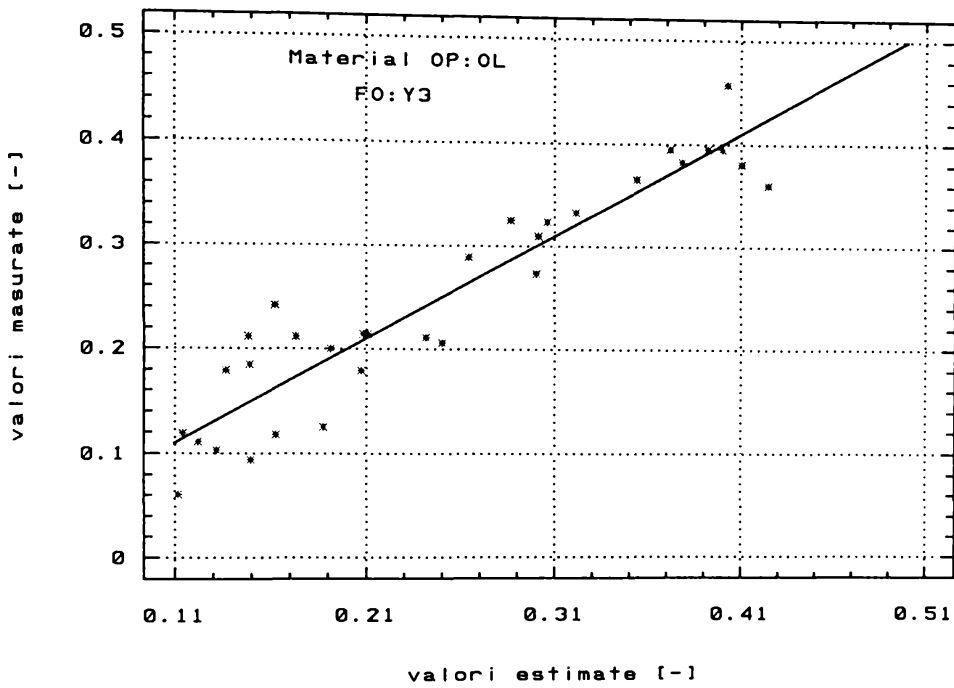


Fig. 4.56

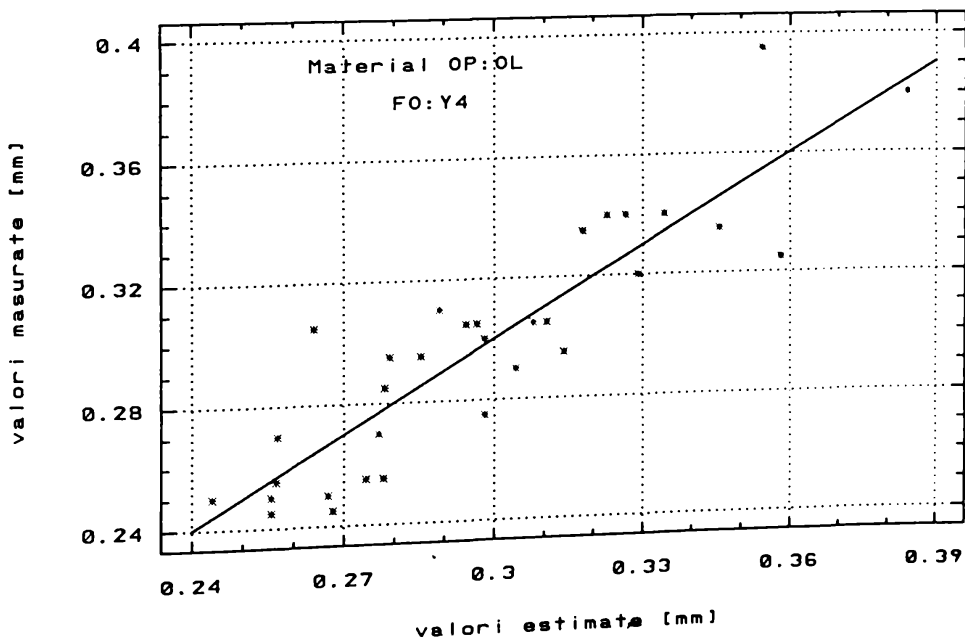


Fig. 4.57

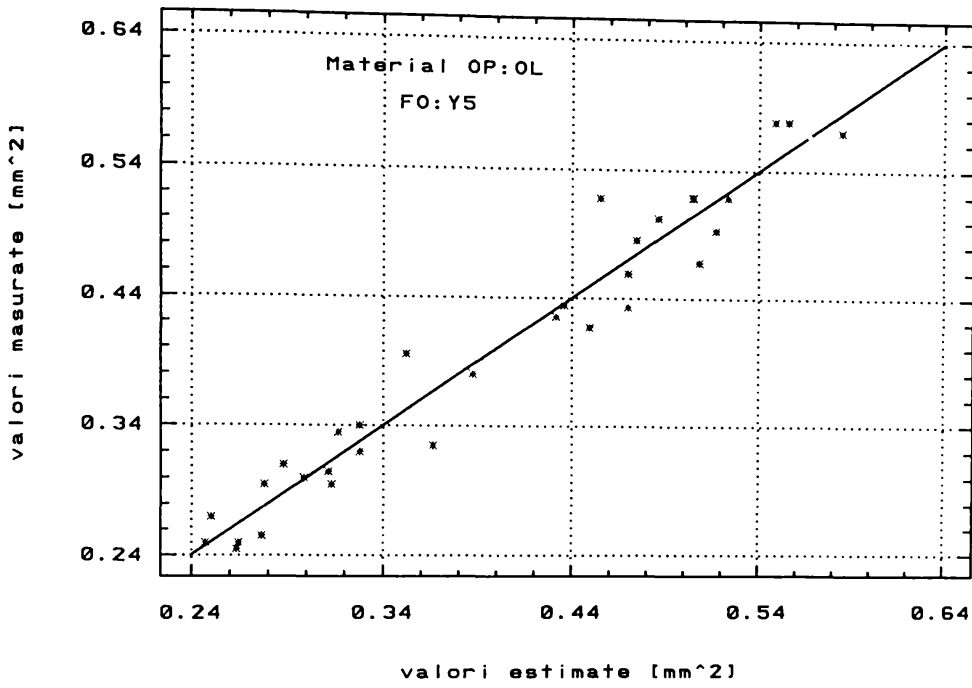


Fig. 4.58

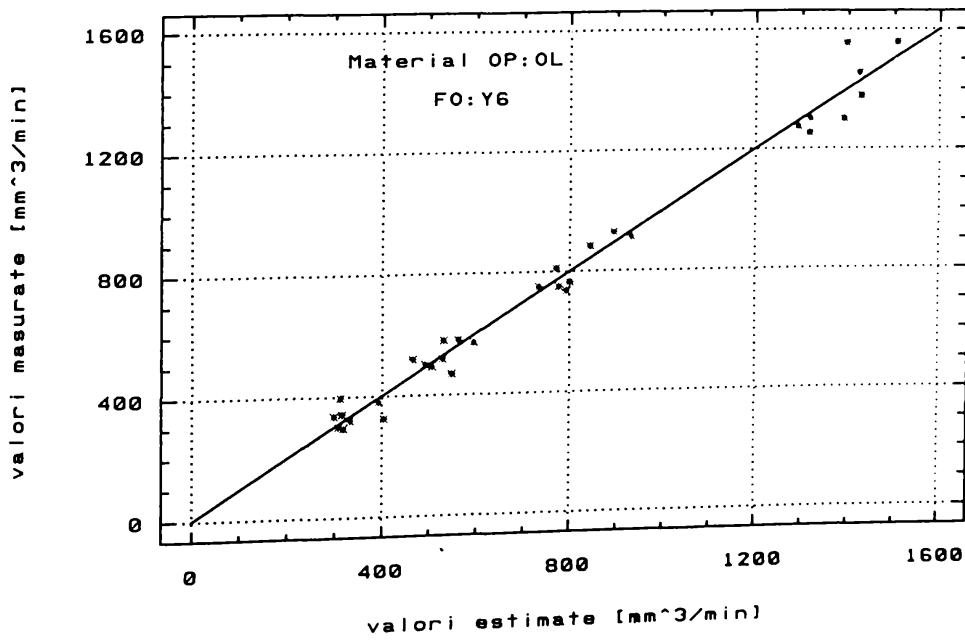


Fig. 4.59

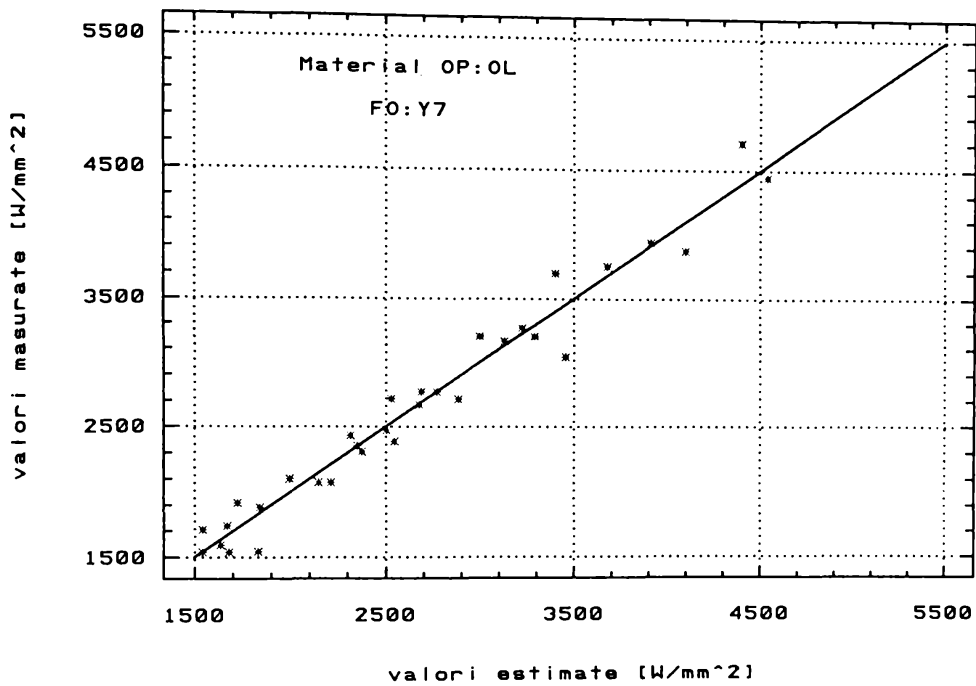


Fig. 4.60

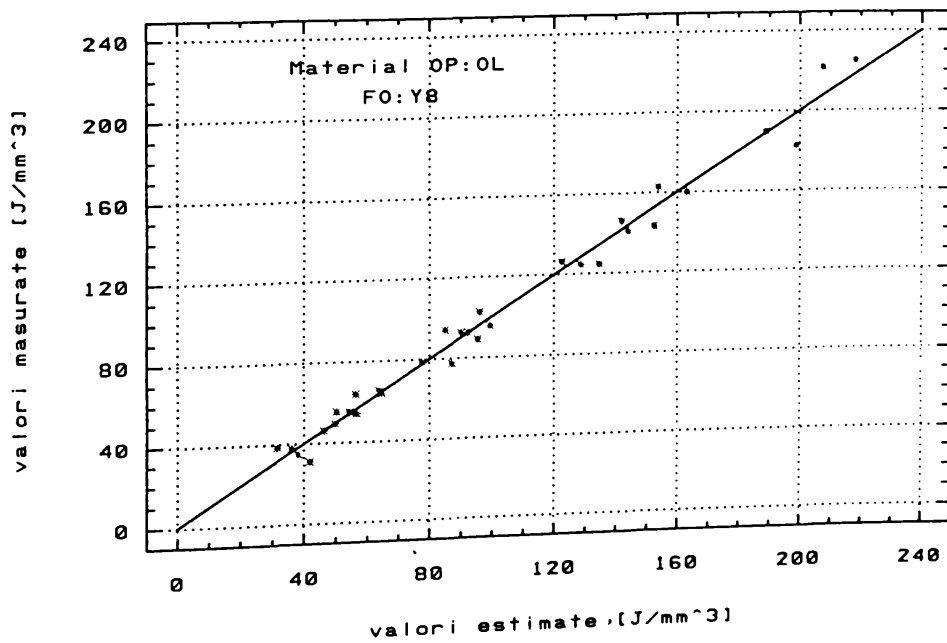
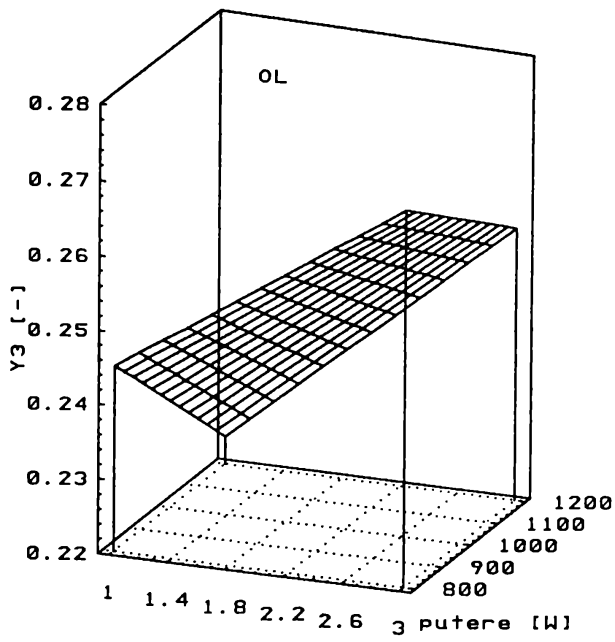


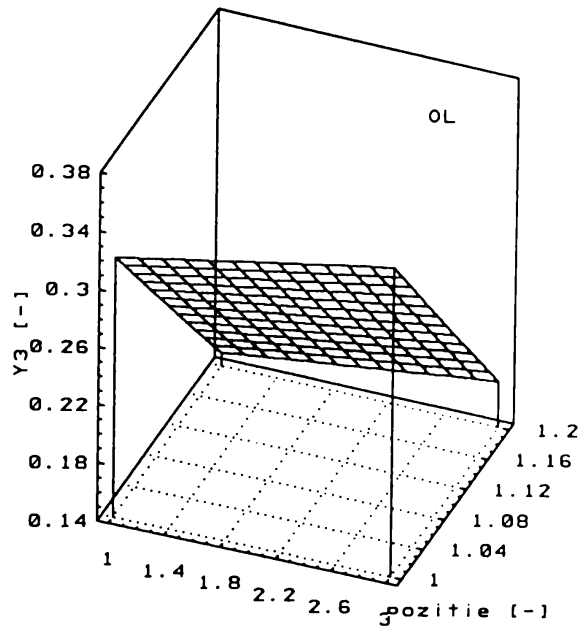
Fig. 4.61



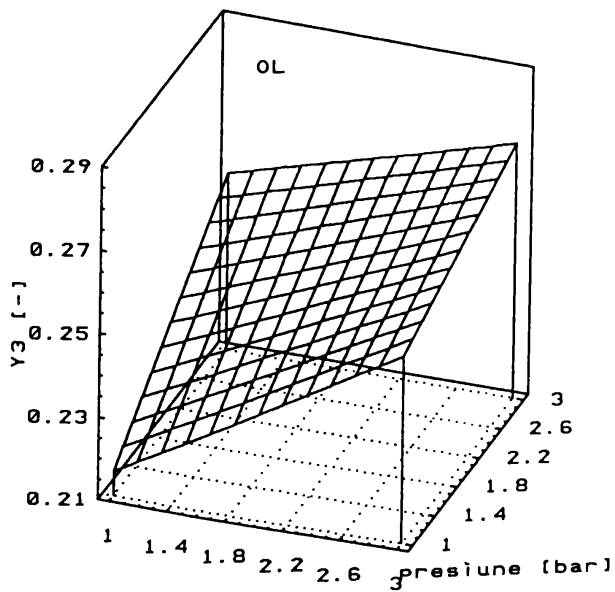


viteză [m/min]

Fig. 4.62

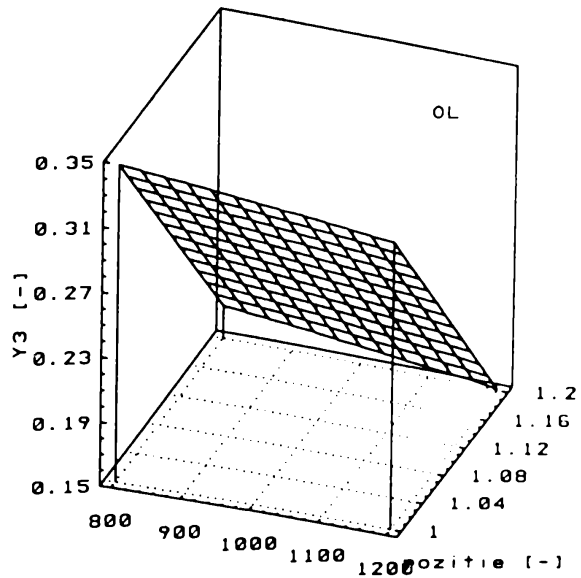


viteză [m/min]



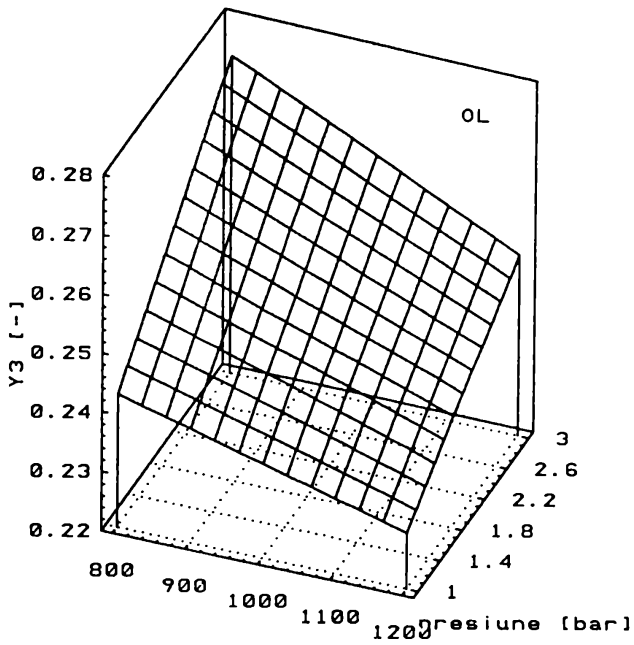
viteză [m/min]

Fig. 4.64



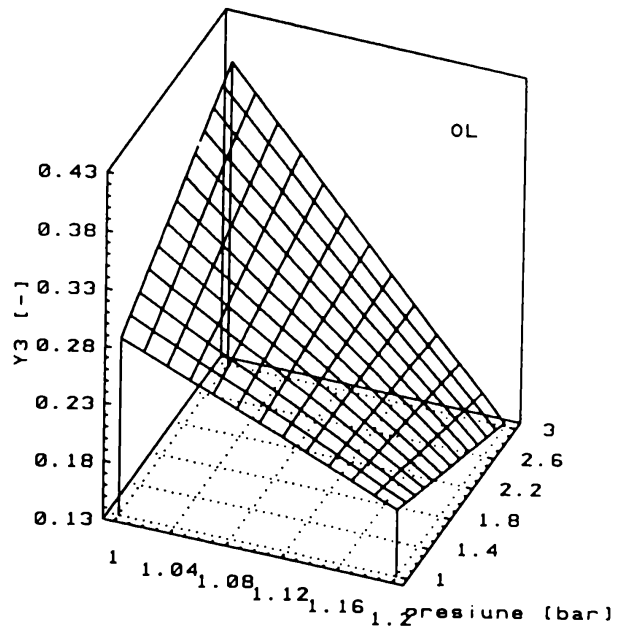
putere [W]

Fig. 4.65



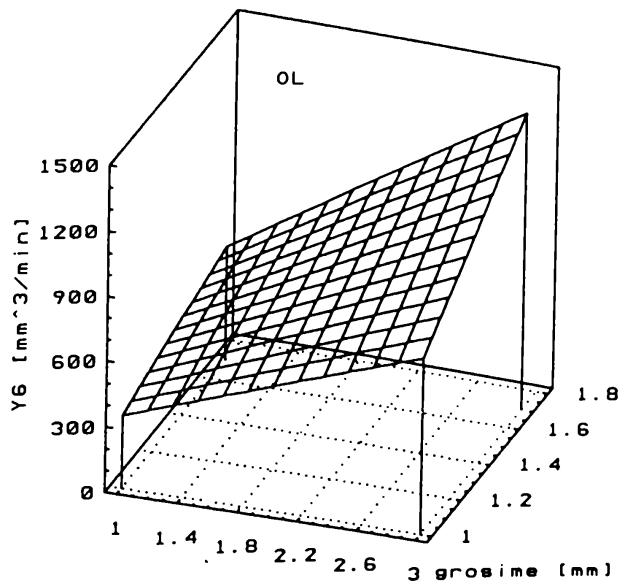
putere [W]

Fig. 4.66



pozitie [-]

Fig. 4.67



viteza [m/min]

Fig. 4.68

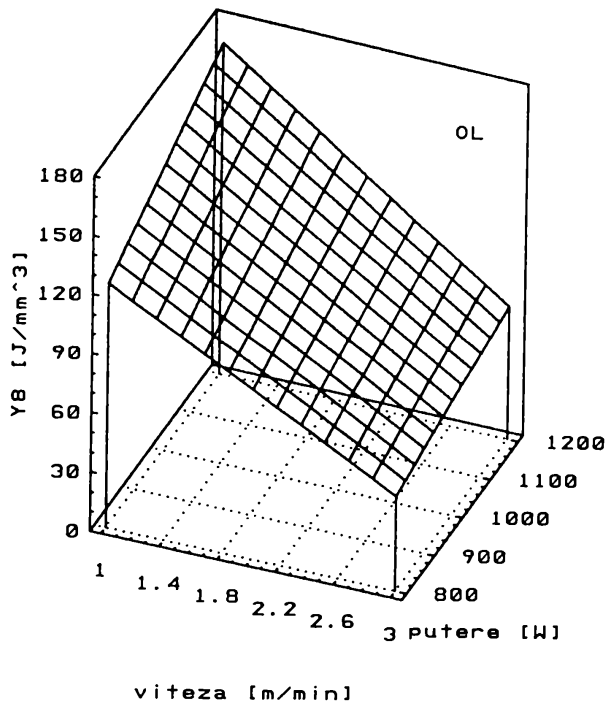


Fig. 4.69

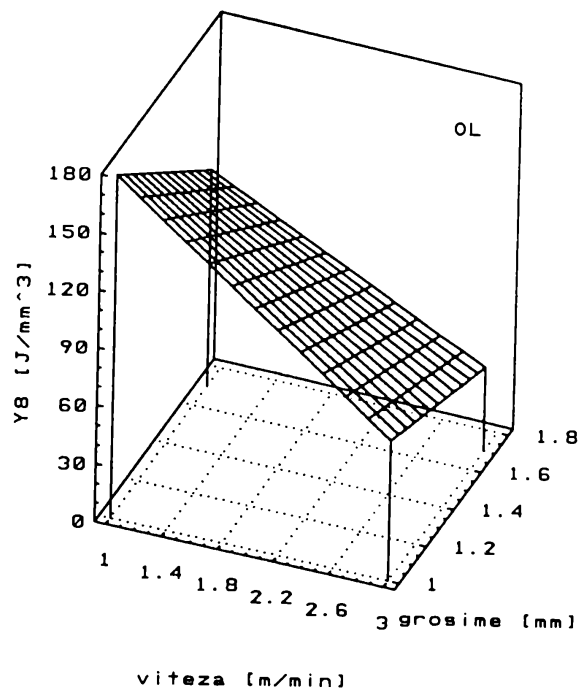


Fig. 4.70

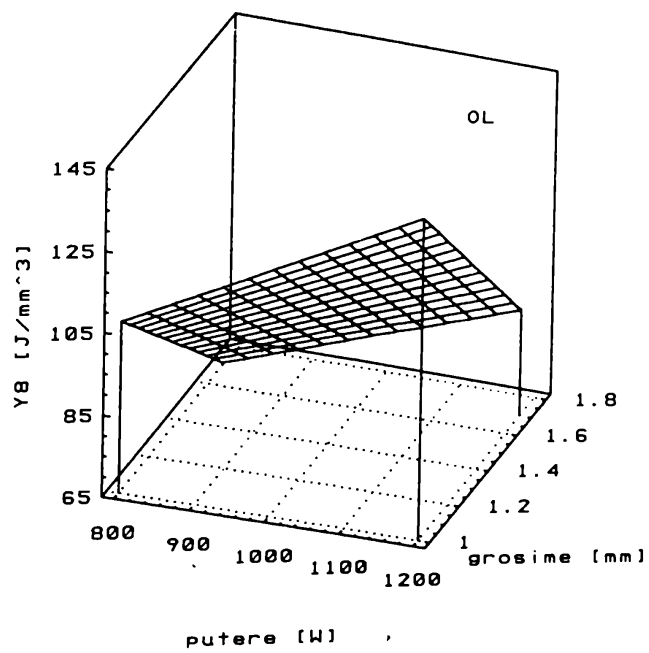


Fig. 4.71

#### 4.4.3.3 Concluzii si posibilități de optimizare

Analiza făcută în urma prelucrării datelor experimentale, sintetizată în tab.4.21 si tab.4.22, respectiv fig.4.46...fig.4.71, permite formularea următoarelor concluzii asupra TL a OL:

a) TL a OL este rezultatul unui proces mai complicat decât cel întâlnit la TL a PMMA, în principal datorită reacțiilor chimice între gazul de lucru ( $O_2$ ) si OP; aceasta se materializează pe de o parte în schimbarea ordinii importanței FI de la o FO la alta, nemaexistând nici un FI care să apară în mod sistematic pe ultimul loc (cum a fost presiunea gazului de lucru la TL a PMMA) si, pe de altă parte, prin scăderea fidelității modelelor experimentale în raport cu cele de la TL a PMMA (vezi precizia de estimare a modelului din tab.4.21 si tab.4.22);

b) menținerea unei precizii ridicate a estimăției în cazul modelelor experimentale găsite (la șase FO de peste 80% si la toate FO practic de minim 70%) permite utilizarea modelelor experimentale găsite atât pentru interpolări, cât si la identificarea valorilor FI care în domeniul explorat, funcție de criteriile precizate, optimizează FO;

c) interacțiunile dintre FI sunt în general ne semnificative;

d) viteza de tăiere  $v$  si puterea laser  $P_L$ , rămân FI de primă importanță pentru toate FO, în vreme ce grosimea OP,  $s$ , este mai puțin importantă decât presiunea gazului de lucru în cazul FO  $Y_{F1}...Y_{F4}$ , situația inversându-se pentru FO  $Y_{F5}...Y_{F8}$ ;

e) dependențele funcționale existente între FI si FO nu presupun existența unor puncte de extrem (cu derivată zero) nici în domeniul de interes tehnologic si nici în afara lui (vezi si modelarea analitică a TL a OL în paragraful 3.4); buna concordanță între valorile estimate si cele măsurate ale FO, face ca modelele experimentale găsite să permită formularea condițiilor necesare si suficiente, ce trebuiesc îndeplinite de FI în scopul atingerii obiectivului propus (maximizare sau minimizare) de către FO;

f) identificarea zonelor de optim ale FO se poate face fie apelând la relațiile polinomiale găsite, fie, mai ușor, prin referire la suprafețe de răspuns de tipul celor reprezentate în fig.4.62...fig.4.71.

Pentru cazul acelorași FO ca si în paragraful 4.4.2., rezultă că sensurile lor de variație pentru atingerea unor performanțe cât mai bune la TL a OL, trebuie să fie:

-  $Y_{F3} \Rightarrow$  **minimizare**;

-  $Y_{F6} \Rightarrow$  **maximizare**;

-  $Y_{F8} \Rightarrow$  **minimizare**.

Din analiza modelelor regresionale (tab.4.21 si tab.4.22), a histogramelor efectelor (fig.4.46...fig.4.53) si a suprafețelor de răspuns (fig.4.62...fig.4.71), rezultă următoarele concluzii:

- atât  $Y_{F6}$  cât si  $Y_{F8}$  depind semnificativ de **FI**:

-  $X_{F1} \Rightarrow v$  [m/min];

-  $X_{F3} \Rightarrow s$  [mm],

precum si de interacțiunea acestor două mărimi;  $v$  si  $s$  au influențe diferite asupra celor două **FO**: asupra  $Y_{F6}$  direct proporțională si asupra  $Y_{F8}$  invers proporțională:

- **FI**  $X_{F1}$  ( $v$ ) este printre **FI** semnificativi si în cazul **FO**  $Y_{F3}$ .

Aceste influențe au drept consecință următoarele:

a) atât  $Y_{F6}$ , cât si  $Y_{F8}$  pot fi dirijate spre valori care să corespundă atingerii unor performanțe superioare utilizându-se (în ordinea importanței):

-  $v$  [m/min]  $\uparrow$ ;

-  $P_L$  [W]  $\downarrow$ ;

Performanțe superioare se ating în cazul **TL** a **OP** subțiri  $\Rightarrow s$  [mm]  $\downarrow$ :

Aceasta înseamnă că, în spațiul multifactorial explorat, o creștere a volumului de material erodat în unitatea de timp, se realizează simultan cu scăderea consumului energetic pe unitatea de volum de material erodat pentru următoarele valori:

-  $v = 3$  m/min;

-  $s = 1,7$  mm;

-  $P_L = 800$  W;

profilul unei tăieturi care îndeplinește aceste condiții (poz. 3 din tab.4.19) se observă în fig. 4.72. Este de remarcat faptul că în acest caz, **FO** au valorile:

-  $Y_{F6} = 1683$  mm<sup>3</sup>/min (față de o medie a măsurărilor de 768 mm<sup>3</sup>/min);

-  $Y_{F8} = 28,5$  J/mm<sup>3</sup> (față de o medie a măsurărilor de 102 J/mm<sup>3</sup>);

paralelismul pereților acestei tăieturi este însă relativ scăzut:  $Y_{F3} = 0,216$ , adică apropiat de valoarea medie care este 0,264.

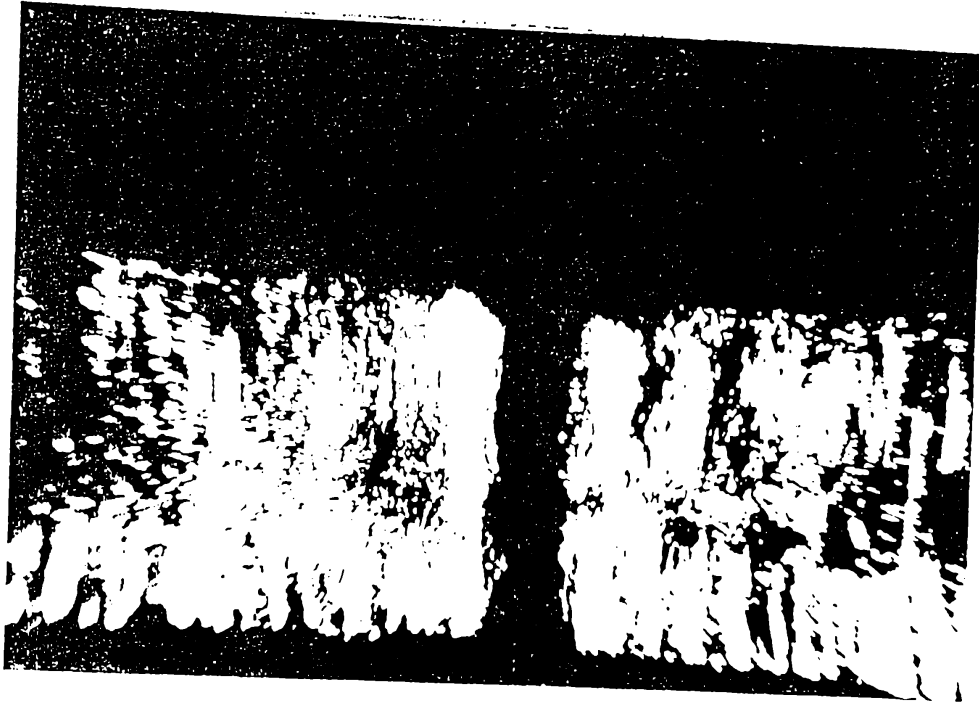


Fig.4.72

b) valori ridicate ale paralelismului pereților tăieturii se obțin pentru (în ordinea importanței):

- SL situat deasupra suprafeței OP;
- $v$  [m/min] ↓;
- $p$  [bar] ↑;
- $P_l$  [W] ↑.

În spațiul multifactorial analizat, aceste condiții sunt îndeplinite pentru:

- SL situat deasupra OP cu 20% din grosimea acestuia;
- $v = 1$  m/min;
- $p = 3$  bar;
- $P_l = 1200$  W;

profilul unei tăieturi care îndeplinește aceste condiții (poz.2 din tab.4.19) se observă în fig. 4.73. Este de remarcă faptul că în acest caz valorile FO sunt:

- $Y_{F3} = 0.061$  [-] ( $B = 0.33$  mm,  $b = 0.35$  mm);
- $Y_{F6} = 576$  mm<sup>3</sup>/min;
- $Y_{F8} = 124.6$  J/mm<sup>3</sup>.

deci, în cazul  $Y_{F6}$  și  $Y_{F8}$ , performanțele sunt mult sub valorile medii.

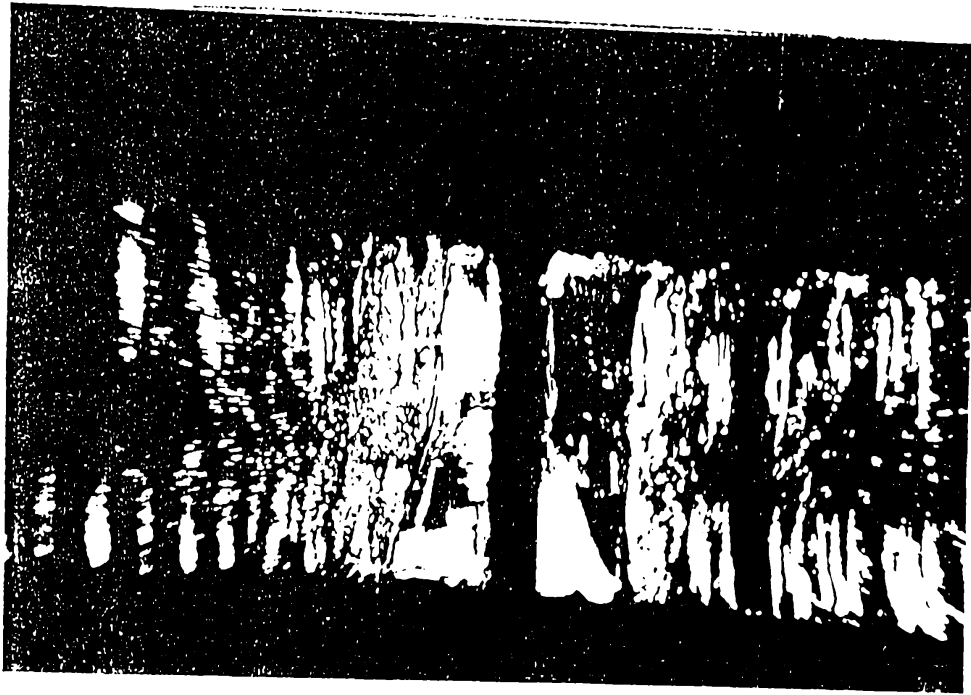


Fig.4.73

Din analiza de mai sus, rezultă că și la **TL** a **OL**, productivitatea și consumul energetic pe de o parte și calitatea tăieturilor, pe de altă parte, sunt obiective ce nu pot fi atinse simultan. În plus, se poate face precizarea că pentru **TL** atât a **PMMA**, cât și a **OL**, pentru îmbunătățirea valorilor  $Y_{F6}$  și  $Y_{F8}$  sunt necesare **OP** de grosimi mari, tăiate cu viteze mari, în vreme ce paralelism ridicat al pereților tăieturii se obține pentru viteze de tăiere mici.

Cele prezentate în capitolul 4 permit susținerea afirmației că modelarea experimentală a **TL** a **PMMA** și **OL** și-a atins principalele obiective:

- identificarea unor modele experimentale pe baza cărora să se realizeze estimări în bună concordanță cu valorile măsurate;
- precizarea unor sensuri de variație pe care trebuie să le urmeze **FI** pentru îmbunătățirea performanțelor tehnologice ale **TL**.

## CAPITOLUL 5

### ALGORITM GENERAL PENTRU MODELAREA TAIERII LASER ÎN SCOPUL OPTIMIZĂRII TEHNOLOGIEI

Ca o generalizare a rezultatelor obținute în cap.3 și cap.4 ale tezei de doctorat, în continuare se propune următorul algoritm pentru modelarea TL în scopul optimizării tehnologiei:

1. Identificarea procedurii prin care are loc TL și precizarea fenomenologiei de formare a FE.
2. Stabilirea FO și recunoașterea acestora ca elemente ale mulțimilor F, R sau MS.
3. Formularea ipotezelor în care are loc TL, prin atribuirea de valori concrete sau definirea ca parametri variabili a elementelor mulțimilor L, G, M și PR.
4. Identificarea ecuațiilor fundamentale utilizate pentru obținerea modelului analitic al TL prin procedeul precizat.
5. Elaborarea modelului analitic al TL prin particularizarea ecuațiilor fundamentale cu condițiile în care are loc formarea FE și introducerea explicită a FO și FI identificați ca parametri variabili.
6. Evidențierea grafică a dependenței între FO și FI pentru întregul domeniu de existență al FI.
7. Stabilirea cu ajutorul modelului analitic a celor mai convenabile valori ale FO și identificarea valorilor sau intervalelor de valori ale FI care implică atingerea nivelelor căutate ale FO.
8. Acceptarea ca parametri variabili și a altor FI decât cei cuprinși în modelul analitic și includerea tuturor FI într-un experiment de premodelare care să permită ierarhizarea în ordinea importanței influenței asupra FO a FI precizați. Valorile nivelelor FI din experimentul de premodelare vor fi alese în jurul valorilor estimate cu ajutorul modelului analitic, pentru FI ce apar în model, sau pe baza informațiilor anterioare deținute despre procedeul de TL analizat, pentru FI ce nu apar în modelul analitic.



9. Dacă se consideră necesar, verificarea prin analiză dispersională unifactorială a semnificației **FI** analizați, în vederea includerii lor într-un experiment de modelare.

10. Proiectarea experimentului factorial de modelare în jurul punctului găsit ca fiind cel mai convenabil în urma estimațiilor făcute cu ajutorul modelului analitic. Modelarea poate fi realizată doar prin experiment de ordinul I sau, dacă acesta nu asigură modelului o fidelitate multumitoare, se recurge și la experiment de ordinul II.

11. Realizarea experimentului, prelucrarea rezultatelor măsurărilor și formularea concluziilor privind modelarea experimentală.

12. Identificarea, zonelor, valorilor sau tendințelor **FI** care asigură optimizarea **FO**.

Etapele descrise mai sus sunt prezentate în schema logică din fig.5.1.

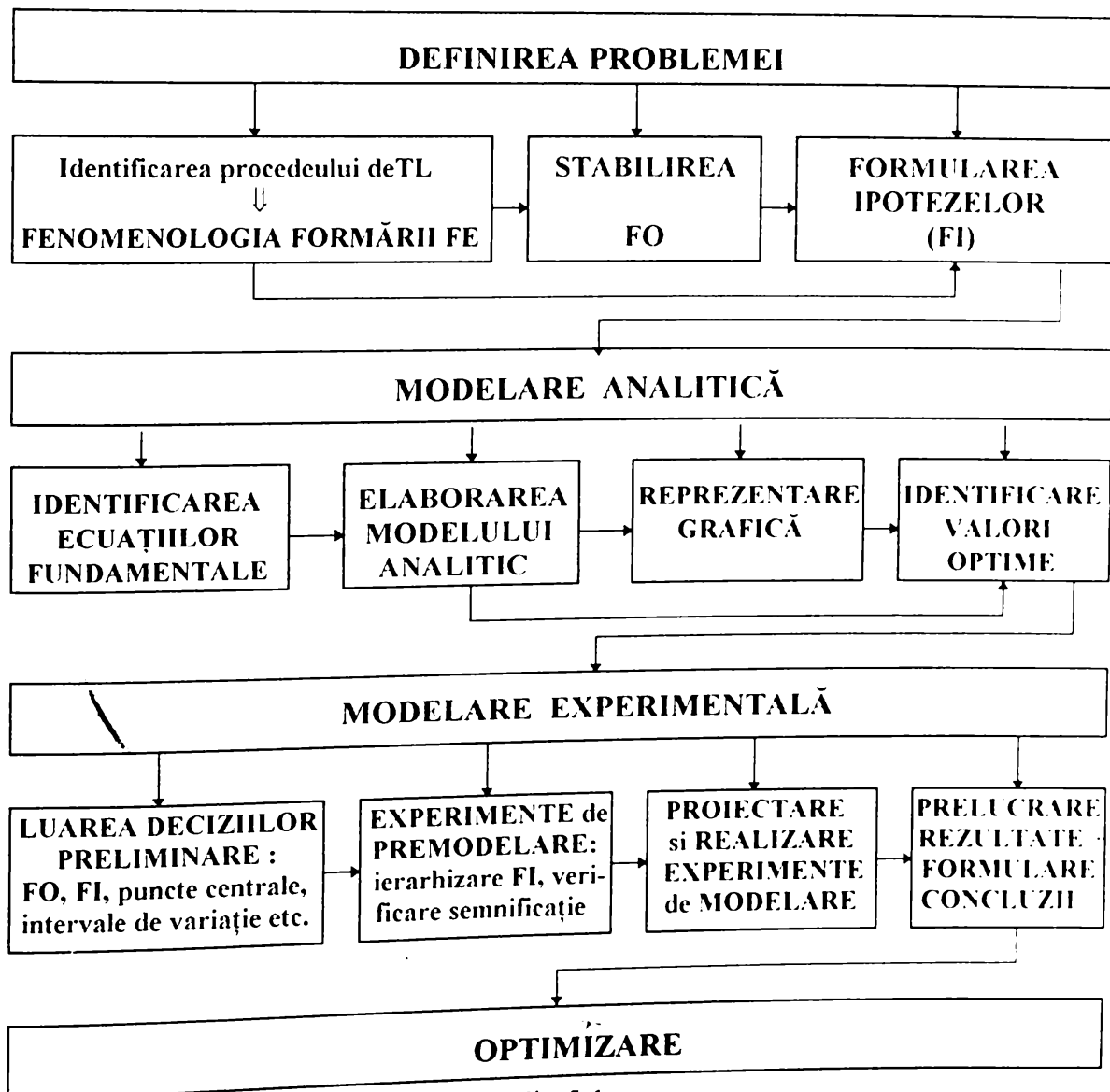


Fig.5.1

Cercetările făcute în cadrul tezei de doctorat au drept consecință formularea următoarelor observații în legătură cu etapele algoritmului de mai sus:

1. În situația în care **TL** are loc prin unul din procedeele:

- **TL** prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru;
- **TL** prin oxidare, topire și vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv;
- **TL** prin descompunere termochimică,

fenomenologia formării **FE** este descrisă în paragraful 2.4.

2. În situația în care **FO** depind explicit de lățimea tăieturii, formularea ipotezelor în care are loc **TL** și identificarea ecuațiilor fundamentale utilizate la obținerea modelului analitic al **TL** este descrisă în paragraful 3.2.

3. În situația în care condițiile de mai sus se confirmă și, în plus, **TL** este realizată cu ajutorul unei radiații laser  $\text{CO}_2$  cw, pentru estimări primare, pot fi utilizate modelele analitice și dependențele grafice realizate pe baza acestora și prezentate în paragrafele 3.3., 3.4. sau 3.5.

4. Pentru procedeele de **TL** enumerate la observația 1., poate fi acceptată ierarhizarea **FI** prezentată în paragraful 4.3., iar modelarea experimentală poate fi proiectată, realizată și prezentată după aceeași structură ca cea prezentată în paragraful 4.4.

5. Pe **OP** prelucrate pot fi analizate și alte **FO** decât cele care depind explicit de lățimea tăieturii.

6. Algoritmul prezentat poate fi aplicat practic oricărui procedeu de **TL** a oricărui tip de material. El prezintă următoarele mari avantaje:

- nu necesită elaborarea unor modele analitice complicate, greoaie în utilizare;
- presupune un volum experimental relativ redus, ținând cont de complexitatea fenomenelor analizate și de numărul **FI** incluși în modelare;
- se pretează la extinderea aplicării lui, prin includerea de noi **FI** sau **FO**, fără ca prin aceasta structura algoritmului să trebuiască a fi modificată.

Algoritmul elaborat și-a dovedit eficiența prin aplicarea la trei dintre cele mai răspândite procedee de **TL**, atât în cazul materialelor metalice, cât și nemetalice.

## CAPITOLUL 6

### CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE

Pe baza celor prezentate în capitolele anterioare ale tezei de doctorat, pot fi formulate următoarele concluzii finale:

- **TL** cu îndepărtarea integrală a materialului în lungul suprafeței de separare este un procedeu tehnologic complex, a cărui înțelegere și descriere corectă pot fi realizate pornind de la fenomenologia formării **FE**; pentru aceasta este necesar ca în prealabil să fie definit corect și complet **FL** ca agent eroziv, iar în urma absorbției radiației laser de către **OP**, să se realizeze o caracterizare cât mai fidelă realității a sursei termice dezvoltate în material;

- datorită specificității proceselor apărute, precum și a numărului mare de **FI** și de interacțiuni dintre ei, modelarea în vederea optimizării a tehnologiei **TL** este cel mai rațional să se facă în două etape:

- modelarea analitică, având la bază ipoteze simplificatoare și ecuații fundamentale, care să permită găsirea unor dependențe relativ simple dar suficient de fidele între elemente ale mulțimii **FI** și elemente ale mulțimii **FO**, astfel încât estimările cu ajutorul modelelor găsite să fie făcute cu o precizie rezonabilă;

- modelarea experimentală care, pornind de la rezultatele modelării analitice, să permită, fără o aprofundare a înțelegerii fenomenologiei **TL**, obținerea unor modele regresionale care, ca urmare a preciziei ridicate a estimațiilor făcute cu ajutorul lor, să poată fi utilizate efectiv în practică pentru satisfacerea, în spațiul multifactorial explorat a unor criterii de optimalitate impuse **FO**; optimizarea raportului volum experimental/fidelitate model se poate realiza prin efectuarea succesivă a unui experiment de premodelare și a unuia de modelare;

- aplicarea cu succes a celor două etape la modelarea a trei procedee frecvent întâlnite în practica tehnologică:

- **TL** prin topire și vaporizare limitată cu suflarea unui gaz de lucru neutru;

- TL prin oxidare, topire si vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru reactiv;
- TL prin descompunere termochimică,

constituie o premisă pentru a propune generalizarea acestei metodologii de abordare, pentru toate procedeele de TL a materialelor; un prim pas în acest sens a fost făcut prin propunerea unui algoritm general de optimizare a tehnologiei TL; acest fapt a fost ușurat ca urmare a:

- definirii unitare a FI si a FO, independent de procedeul de TL analizat;
- formulării extrem de generale dar în același timp foarte eficiente a ipotezelor si ecuațiilor fundamentale utilizate în modelarea analitică;
- obținerii unui model analitic general al TL prin procedeele enumerate mai sus.

Contribuțiile originale ale autorului în rezolvarea problemelor abordate în teza de doctorat apar:

a) în domeniul teoretic prin:

1. elaborarea unei concepții noi si unitare privind modelarea analitică a procedeelelor de TL;
2. definirea într-o manieră originală a FI si FO, astfel încât orice problemă concretă de TL devine un caz particular ușor de definit al problemei generale de TL;
3. materializarea, prin modelele analitice elaborate, a ideii că particularitatea procedeelelor de TL rezultă din fenomenologia formării FE;
4. explicitarea pe baza ecuației conservării energie pe FE a trei modele analitice relativ simple dar si suficient de fidele pentru ca estimările făcute cu ajutorul lor să poată fi utilizate ca puncte de plecare pentru modelarea experimentală;
5. reprezentarea suprafețelor de răspuns care stabilesc legătura între mărimile  $b_m$ ,  $P_l$  si  $v$ , pentru diferite grosimi,  $s$ , ale OP;
6. elaborarea unui model analitic general al TL;
7. estimarea pe cale analitică a grosimii stratului de metal topit, ca factor determinant în formarea striatiunilor, pentru cazul TL topire si vaporizare cu suflarea unui gaz de lucru neutru;
8. identificarea unor relații simple si trasarea suprafețelor de răspuns care permit determinarea parametrilor limită viteză maximă de tăiere,  $v_{max}$  si grosime

maximă a materialului **OP** ce poate fi tăiat în condiții date,  $s_{max}$  ;

9. prezentarea, în conformitate cu obiectivele tezei de doctorat, a fenomenologiei **TL** cu **FL CO<sub>2</sub> cw**;

b) în domeniul experimental prin:

1. proiectarea unei strategii experimentale unitare, aplicabilă practic oricărui material tăiat cu laseri, care realizează creșterea eficienței modelării prin creșterea raportului (informații furnizate)/(volum experiment);

2. susținerea prin rezultate experimentale a ipotezelor teoretice privind caracterul fenomenologic diferit în care are loc **TL** a **PMMA** și respectiv **OL**;

3. evidențierea prin analiza a două **FO** diferite a faptului că formarea geometriei tăieturii se realizează principial diferit pe partea superioară și respectiv inferioară a **OP**;

4. proiectarea și realizarea unor experimente care au permis obținerea unei clasificări în ordinea importanței asupra lățimii tăieturilor a **FI** mai întâlniți în practică la **TL** a **PMMA** și **OL**;

5. proiectarea și realizarea pentru **TL** a **OL** și **PMMA** a unor experimente factoriale complete care au furnizat modele regresionale de mare fidelitate pentru numeroase **FO** de interes tehnologic;

6. evidențierea experimentală a lipsei de semnificație a culorii **PMMA** asupra lățimii tăieturilor executate cu **FL CO<sub>2</sub> cw**;

7. trasarea pentru **FO** de interes tehnologic a suprafețelor de răspuns funcție de **FI** semnificativi, în vederea formulării de concluzii privind optimizarea tehnologiei de **TL**;

8. elaborarea unui algoritm general de proiectare a modelării **TL** a materialelor în vederea optimizării tehnologiei.

Teza de doctorat nu a epuizat tema optimizării tehnologiei **TL** a materialelor. Între problemele rămase în continuare deschise pot fi enumerate:

1. necesitatea elaborării unui standard în domeniul **TL** a materialelor.

2. elaborarea unor modele analitice care să permită calculul și a altor **FO**, aparținând mulțimilor **F**, **R** și **MS**;

3. definirea noțiunii de calitate globală a tăieturii și identificarea unui model analitic care să permită determinarea acesteia;

4. realizarea unei ierarhizări în ordinea importanței a **FO**, eventual pe baza unui punctaj, astfel încât să poată fi proiectat și efectuat un experiment care să permită obținerea unei optimizări globale a tehnologiei de **TL**.

## BIBLIOGRAFIE

1. Abakians, H., Modest, M.F., *Evaporative Cutting of a Semitransparent Body With a Moving CW Laser*, Transactions of the ASME, vol.110, november, 1988, pag.924-930.
2. Achimescu, N., Popovici, V., *Studiul procesului de formare a geometriei tăieturii la debitarea cu laser a materialelor nemetalice organice*, A III-a Conferință Națională "Lasere și aplicații. Timișoara, 1991, pag. 199-205.
3. Adler, Y., *The design of experiments to find optimal conditions*, Mir Publ., Moskow, 1975.
4. Anderson, S.G., *Complex tests exploit laser technology*, Laser Focus World, july, 1994, pag.71-78.
5. Anderson, S.G., *Review and forecast of laser markets:1996*, Laser Focus World, january, 1996, pag.50-69.
6. Banas, C., *Laser Materials Processing Data-Fact or Fiction?*, The Industrial Laser Handbook, 1989, Springer-Verlag, New York, pag.40-44.
7. Belforte, D.A., ș.a. *Guide for material processing by lasers*, LIA.Toledo,1983
8. Berloff, E.H., *Laser cutting-principal system aspects and practical results*, Proceedings of the SPIE, vol.650, 1986, pag.289-294.
9. Berloff, E.H., Witzmann, J., *Laser materials cutting and related phenomena*, Proceedings of the SPIE, vol 455, 1984, pag.96-101.
10. Beyer, E., ș.a., *A diagnostic system for measurement of the focused beam diameter of high power CO<sub>2</sub> lasers*, LIM-4, Springer-Verlag, New York, 1987, pag.37-44.
11. Biermann, S., ș.a., *Analytical studies on laser cut surfaces*, Proceedings of the SPIE, vol.1031, 1988, pag.586-591.
12. Biyikli, S., Modest, M.F., *Beam Expansion and Focusing Effects on Evaporative Laser Cutting*, Journal of Heat Transfer, 1988, may, vol.110, pag.529-532.
13. Carts, Y.A., *Integrated-optics designers served by Beam-propagation-mode software*, Laser Focus World, march, 1993, pag.155-156.
14. Chan, C.L., ș.a., *Three-Dimensional Model for Convection in Laser Weld Pool*, Proceedings of the 3rd Conference MCWP, The Metallurgical Society, 1986, pag.229-246.
15. Chan, C.L., Mazumder, J., *One-dimensional steady-state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser-material interaction*, J. Appl. Phys., vol. 62, december, 1987, pag.4579-4586
16. Chryssolouris, G., *Laser Machining*, Springer-Verlag, New York, 1991.

17. Chun, M.K., Rose, K., *Interaction of High-Intensity Laser Beam with Metals*, J.Appl.Phys., vol.41, no.2, february, 1970, pag.614-620.
18. Cicală, E., *Stadiul actual si perspective ale tăierii conturate cu laseri*, Timișoara, 1991, referat I, nepublicat.
19. Cicală, E., *Modelarea proceselor de tăiere cu laseri*, Timișoara, 1992, referat II, nepublicat.
20. Cicală, E., *Analiză critică si constructivă a modelării matematice a procesului de tăiere conturată cu laseri a materialelor industriale*, în "TEHNOMUS'VI", Suceava, 1991, pag.9-16.
21. Cicală, E., *Modele fizice ale tăierii materialelor cu fascicul laser*, Lucrările Sesiunii de Comunicări Științifice, Universitatea "Aurel Vlaicu", Arad, vol.III, 1992, pag.169-179.
22. Cicală, E., *Determinarea relației analitice optime viteză de tăiere-grosime material la decuparea cu laseri a materialelor polimerice*, Sesiunea de Comunicări Științifice a Universității "Eftimie Murgu", Reșița, 1993.
23. Cicală, E., *Modelarea procesului de tăiere cu laseri*, Sesiunea de Comunicări Științifice a Universității "Eftimie Murgu", Reșița, 1993.
24. Cicală, E., *Prelucrabilitatea materialelor prin tăiere cu laseri*, Sesiunea de Comunicări Științifice a Universității "Eftimie Murgu", Reșița, 1993.
25. Cicală, E., *Analiza factorilor de influență asupra formării lățimii tăieturilor la debitarea cu fascicule laser a materialelor* Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
26. Cicală, E., *Model analitic si algoritm pentru calculul lățimii tăieturii la decuparea cu fascicul laser a materialelor*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea TCM, Oradea, 1993, pag.97-102.
27. Cicală, E., *Parametrii de definire a fasciculelor laser CO<sub>2</sub> cu agenți erozivi în procesarea materialelor*, în Proceedings of the Scientific Communications Meeting of "Aurel Vlaicu" University, Third Edition, Arad, 1996, vol.1, pag.28-33.
28. Cicală, E., *Determinarea coeficientului de absorbție al materialelor la prelucrarea cu laseri CO<sub>2</sub>*, în Proceedings of the Scientific Communications Meeting of "Aurel Vlaicu" University, Third Edition, Arad, 1996, vol.1, pag.34-39.
29. Cicală, E., *Stabilirea prin analiză dispersională a semnificației culorii plexiglasului asupra geometriei tăieturilor executate cu laseri CO<sub>2</sub>*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1996.
30. Cicală, E., *Formarea frontului de eroziune la tăierea cu laseri prin topire si vaporizare*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1996 .



31. Cicală, E., Zsivanov, D., *Mărimi de interes practic la tăierea materialelor cu fascicul laser*, Analele Universității “Eftimie Murgu”, Reșița, 1996, fascicola II, pag.17-22.
32. Cicală, E., Zsivanov, D., *Soluții particulare ale ecuației căldurii la modelarea proceselor de tăiere cu laseri*, Analele Universității “Eftimie Murgu”, Reșița, 1996, fascicola II, pag.23-26.
33. Cicală, E., Zsivanov, D., *La hiérarchisation des facteurs d'influence prépondérants de la largeur du trait de coupe réalisé par des lasers CO<sub>2</sub>- cw*, Buletinul Științific al UPT, tom 41(55), Mecanică, Timișoara, 1996.
34. Crafer, R.C., *Heat flow and fluid aspects of CO<sub>2</sub> laser welding*, in Applied Laser Tooling, Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, 1987.
35. Crane, K.C.A., ș.a., *Ablation of material subjected to laser radiation and high-speed gas flows*, J.Appl.Phys., vol.51, no.11, november, 1980, pag.5954-5961.
36. Dausinger, F., *Einkopplung beim Schneiden mit Lasern unterschiedlicher Wellenlänge*, Laser und Optoelektronik, April, 1993, pag.47-61.
37. David, I., *Influența focalizării fasciculului laser asupra lățimii tăieturilor realizate în materiale lemnoase*, A III-a Conferință Națională “Laseri și aplicații”, Timișoara, 1991, pag.193-198.
38. David, Ion, *Cercetări privind parametrii tehnologici la prelucrarea cu laser a microsuprafețelor și interdependența acestora cu materialul supus prelucrării*, rezumatul tezei de doctorat, IPTVT, Timișoara, 1985.
39. David, Ion, ș.a., *Principii de proiectare a tehnologiei de tăiere cu fascicul laser focalizat*, A III-a Conferință Națională “Laseri și aplicații”, Timișoara, 1991, pag.162-173.
40. David, Ion, ș.a., *Tăierea cu laseri a materialelor macromoleculare industriale*, A 15-a Sesiune de Comunicări Științifice a Cadrelor Didactice, Academia Navală “Mircea cel Bătrân”, Constanța, vol.2, 1995, pag.340-345.
41. David, I., Avram, N., *Aspecte energetice la iradierea cu fascicul laser CO<sub>2</sub> a materialelor organice subțiri*, A III-a Conferință Națională “Laseri și aplicații”, Timișoara, 1991, pag. 206-210.
42. Decker, I., ș.a., *Physical Models and Technological Aspects of Laser Gas Cutting*, Proceedings of the SPIE, vol.1020, 1988, pag.81-87.
43. Decker, I., ș.a., *Facilities of Quality Control in Laser Cutting*, Proceedings of the SPIE, vol.650, 1986, pag.279-284.
44. Doyle, D.J., Kokosa, J.M., *Hazardous by-products of plastics processing with CO<sub>2</sub> lasers*, ICALEO'85, Springer-Verlag, New York, 1985, pag.201-203.

45. Drăgănescu, V., Velculescu, V.G., *Prelucrări termice cu laseri*, Ed.Academiei, București, 1986.
46. Dumitraș, D.C., *Contribuții la studiul laserilor cu CO<sub>2</sub> cu ghid de undă*, Teză de doctorat, IFTAR, București, 1978.
47. Duțu, D.C.A., *Contribuții la determinarea caracteristicilor de emisie a laserilor cu CO<sub>2</sub> și stabilizarea în frecvență a acestora*, Teză de doctorat, IFTAR, București, 1982.
48. Eneff, T., *Thermodynamische Modelle zum härten und schneiden mit Laserstrahlen*, Dissertation, Berlin, 1981.
49. Gonsalves, J.N., Duley, W.W., *Cutting thin metal sheets with the cw CO<sub>2</sub> laser*, J.Appl.Phys., vol.43, no.11, november, 1972, pag.4684-4687.
50. Grigoriu, C., *Contribuții la construcția laserilor CO<sub>2</sub> pulsați*, Teză de doctorat, IFTAR, București, 1982.
51. Hachfeld, K.D., *Laser-beam quality and brightness in industrial applications*, The Industrial Laser Handbook 1992-1993, Springer-Verlag, New York, pag.48-54.
52. Hack, R., ș.a., *Schneiden mit fasergeführten Nd:YAG-Hochleistungslaser-Festkörperlaser dringt in Bereiche des CO<sub>2</sub>-Lasers vor*, Laser und Optoelektronik, April, 1993, pag.62-68.
53. Harrach, R.J., *Analytical solutions for laser heating and burnthrough of opaque solid slabs*, J.Appl.Phys., vol.48, no.6, june, 1977, pag.2370-2383.
54. Harry, J.E., Lunau, F.W., *Electrothermal Cutting Processes Using a CO<sub>2</sub> Laser*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.8, no.4, july/august, 1972, pag.418-424.
55. Hecht, J., *Carbon dioxide lasers span power spectrum*, Laser Focus World, september, 1992, pag.87-96.
56. Herziger, G., *Physics of laser material processing*, Proceedings of the SPIE, vol.650, 1986, pag.188-194.
57. Hobbs, R.J., *Choosing the right power supply for optimum laser performance*, Laser Focus World, march, 1995, pag.159-162.
58. Hobbs, J.R., *Electronics makers switch to precise micromachining tools*, Laser Focus World, march, 1994, pag.69-72.
59. Ion, J.C., *Modelling of laser material processing*, The Industrial Laser Handbook, 1992-1993, Springer-Verlag, New York, pag.39-47.
60. Jones, R.D., Scott, T.R., *Laser-beam analysis pinpoints critical parameters*, Laser Focus World, january, 1993, pag.123-130.
61. Keilmann, F., *Stimulated absorption of CO<sub>2</sub> laser light on metals*, in *Laser Surface Treatment of Metals*, Martinus Nijhoff Publ. Dordrecht, 1986, pag.17-22.
62. King, T.G., Powell, J., *Laser-cut mild steel-factors affecting edge quality*, Wear, 109, 1986, pag.135-144.

63. Kokosa, J.M., Doyle, D.J., *Condensed phase pyrolysates produced by CO<sub>2</sub> laser processing of polymers*, Polymer Preprints, (26), 1985, pag.255-256.
64. Langhorn, C., Gruhlke, R., *How to reduce thermal focusing in high-power laser optics*, Laser Focus World, february, 1993, pag.89-93.
65. Lawrence, G.N., *Proposed international standard for laser-beam quality falls short*, Laser Focus World, july, 1994, pag.109-114.
66. Lax, M., *Temperature rise induced by a laser beam*, J.Appl.Phys., vol.48, no.9, september, 1977, pag.3919-3924.
67. Lim, G.C., *High-speed beam quality measurement technique and results*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, pag.3-8.
68. Lin, D.K.J., *A New Class of Supersaturated Designs*, Technometrics, 1993, vol.35, no.1, pag.28-31.
69. Lund, O.R., Stoltzmann, D.E., *Optimization of Focused Spot Characteristics for Laser Beam Material Processing*, ICALEO'92, Springer-Verlag, New York.
70. Marinescu, N.I., ș.a., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*, Ed. Tehnică, București, 1993.
71. Mazumder, J., *Mathematical modeling of laser surface treatments*, in Laser Surface Treatment of Metals, Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, 1986, pag.185-200.
72. Mazumder, J., Steen, W.M., *Heat transfer model for cw laser material processing*, J.Appl.Phys., vol.51, no.2, february, 1980, pag.941-947.
73. Meijer, J., ș.a., *Shockhardening experiments on austenitic Hadfield steels by high-intensity TEA CO<sub>2</sub> laser pulses*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, 1987, pag. 253-259.
74. Metzbower, E.A., *Heat flow in laser beam welding*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, 1987, pag.37-45.
75. Messenger, H.W., *Advanced in laser technology propel diverse applications*, Laser Focus World, december, 1992, pag.61-72.
76. Meyer, B.E., *Prozessoptimierung beim Laser-Schweissen und Schneiden*, Werkstatt und Betrieb, 121, 1988, (8), pag.661-666.
77. Montgomery, D.C., *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, New York, 1991.
78. Moriyasu, M., ș.a., *Adaptive control for high-speed and high-quality laser cutting*, ICALEO'85, Springer-Verlag, Berlin, 1986, pag.129-136.
79. Nichici, Al., *Fenomenologia și valențele tehnologice ale tăierii termice cu laseri*, A III-a Conferință Națională "Laserei și aplicații", Timișoara, 1991, pag.141-161.
80. Nichici, Al., ș.a., *Regimuri optime de prelucrare cu fascicul laser a materialelor lemnoase de tip furnir*, A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1989, pag.219-224.

81. Nichici, Al., ș.a., *Studii si cercetări privind utilizarea laserului în industria de prelucrare a lemnului*, protocol IPTVT, Timișoara, 1987.
82. Nichici, Al., ș.a., *Influența puterii si vitezei de tăiere cu fascicul laser asupra lățimii tăieturilor executate în materiale lemnoase de tip furnir*, Sesiunea de Comunicări Științifice UMT, Timișoara, vol.I, 1988.
83. Nichici, Al., Cicală, E., *Model analitic al tăierii cu laseri a metalelor în prezența oxigenului*, A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, CNTN, Timișoara, 1993, sect.C, pag.1-6
84. Nichici, Al., Cicală, E., Mee, R., *Prelucrarea datelor experimentale-curs si aplicații*, Lito. UPT, Timișoara, 1996.
85. Nichici, Al., ș.a., *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*. Ed. Facla, Timișoara, 1983.
86. Nichici, Al., Popovici, V., *Efecte de interes tehnologic induse prin acțiunea radiației laser*, Comunicările primei sesiuni tehnico-științifice sătmărene, Satu Mare, 1979, pag.53-58.
87. Nuss, R., ș.a., *Stahlbleche Laserstrahl-Schneiden*, Werkstatt und Betrieb, 122, 1989/6, pag.455-458.
88. Nuss, R., Geiger, M., *Laserstrahlschneiden von Feinblechen*, Werkstattstechnik, 78, 1988, pag.565-568.
89. Olariu., M., ș.a., *Influența razei de curbură asupra geometriei tăieturilor circulare realizate în materiale lemnoase cu fascicul laser*, A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1989, pag.211-214.
90. Olsen, O.F., *Cutting Front Formation in Laser Cutting*, Annals of the CIRP, vol.38/1, 1989, pag.215-218.
91. Osada, H., *Ultra fine cutting by CO<sub>2</sub> laser*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, pag.157-162.
92. Paek, U.C., Kestenbaum, A., *Thermal analysis of thin-film micromachining with lasers*, J.Appl.Phys., vol.44, no.5, may, 1973, pag.2252-2260.
93. Petring, D., ș.a., *Absorption distribution on idealized cutting front geometries and its significance for laser beam cutting*, Proceedings of the SPIE, vol.1020, 1988, pag.123-131.
94. Petring, D., ș.a., *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung*, Feinwerktechnik & Messtechnik, 96, 1988, pag.364-372.
95. Popescu, I.M., *Teoria electromagnetica macroscopică a luminii*. Ed. Științifică si Enciclopedică, București, 1986.
96. Popovici, I., ș.a., *Factori determinanți ai lățimii tăieturii la debitarea cu fascicul laser a materialelor lemnoase de tip PFL melaminat si placaj*, A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara 1989, pag.193-197
97. Powell, J., ș.a., *CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Non-Ferrous Metals*, Proceedings of the SPIE, vol.1020, 1988, pag.156-163.

98. Powell, J., ş.a., *CO<sub>2</sub> laser cutting of non-metallic materials*, Proc. 4th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, LIM-4, Springer-Verlag, New York, 1987, pag.69-82.
99. Powell, J., Menzies, I.A. *Principles and applications of carbon dioxide laser cutting*, Proceedings of the 2nd Conference on Laser Materials Engineering, 1985, London, pag.205-213.
100. Rajendran, N., Pate, M.B., *The thermal response of a material during a laser-cutting process*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, pag.129-134.
101. Ready, J.F., *Effects Due to Absorption of Laser Radiation*, J.Appl.Phys., vol.36, no.2, february, 1965, pag.462-468.
102. Rosen, H.G., *Influence of system parameters on laser materials processing performance*, LIM-4, Springer-Verlag, New York, 1987, pag.201-206.
103. Rosenthal, A.R., *Breites Materialspektrum-Teil 1*, Laser, 1993, April, ausgabe 1, pag.35-39.
104. Rosenthal, A.R., *Breites Materialspektrum-Teil 2*, Laser, 1993, Juni, ausgabe 3, pag.52-54.
105. Roundy, C.B., *Seeing is believing with visual laser-beam diagnostics*, Laser Focus World, july, 1994, pag.117-120.
106. Roundy, C.B., ş.a., *Digital imaging produces fast and accurate beam diagnosis*, Laser Focus World, october, 1993, pag.117-125.
107. Rykalin, N., Kokora, A., *Laser machining and welding*, Mir Publ., Moskow, 1978.
108. Scheiber, E., Lixăndroiu, D., *Mathcad-prezentare si probleme rezolvate*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1994.
109. Schuöcker, D., *Theoretical model of reactive gas assisted laser cutting including dynamic effects*, Proceedings of the SPIE, vol. 650, 1986, pag.210-219.
110. Schuöcker, D., Abel, W., *Material removal mechanism of laser cutting*, Proceedings of the SPIE, vol.455, 1984, pag.88-95.
111. Schuöcker, D., Walter, B., *Theoretical model of oxygen assisted laser cutting*, Inst.Phys.Conf.Ser., No.72, Oxford, 1984, pag.111-116.
112. Sharp, C.M., *CO<sub>2</sub> laser cutting of highly reflective materials*, ICALEO'87, Springer-Verlag, New York, pag.149-155.
113. Slivinsky, S.H., Ogle, N.E., *Laser beam interaction with plastics*, J.Appl.Phys., vol.48, no.9, september, 1977, pag.3660-3664.
114. Sparks, M., *Theory of laser heating of solids: Metals*, J.Appl.Phys., vol.47, no.3, march, 1976, pag.837-849.
115. Steen, W.M., *Laser Material Processing*, Springer Verlag, New York, 1991.
116. Steen, W.M., Kamalu, J.N., *Laser cutting*, in Laser Materials Processing, Ed. M. Bass, North-Holland Publ., 1983.

117. Szekely, J., ș.a., *Heat and Fluid Flow Phenomena in Arc Welding Operations*, Proceedings of the 3rd Conference MCWP, The Metallurgical Society, 1986, pag.247-276.
118. Tam, S.C., ș.a., *Aplication of Taguchi methods in the optimization of the laser-cutting process*, Journal of Materials Processing Technology, 29, 1992, pag.63-74.
119. Topkaya, A., Hatwig, A., *Prozess-und Strahldianostikgeräte für die Lasermaterialbearbeitung*, Laser Magazin, nr.3, 1991, pag.20-26.
120. Ursu, I., ș.a., *Interacțiunea radiației laser cu metalele*, Ed.Academiei, București, 1986.
121. Ursu, I., Lupei, V., *Microprelucrări cu laseri cu solid*, Studii și Cercetări de Fizică, Ed. Academiei, Tomul 40, nr.5-7, 1988, pag.529-560.
122. Vasiliu, V., *Laserii cu He-Ne și aplicațiile lor*, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1987.
123. Vicanek, M., ș.a., *Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting*, J.Phys.D: Appl. Phys., 20, 1987, pag.140-145.
124. Wielage, B., Drozak, J., *CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Keramik und Metall-Keramik-Verbunden*, Metall, Heft 1, Januar, 1991, pag.24-31.
125. Wiener-Avnear, E., *Lasers cut microscopic paths with major potential*, Laser Focus World, july, 1993, pag.75-80.
126. Zefferer, H., ș.a., *Schmeltschneiden von hoch-legierten Chrom-Nickel-Stählen mit CO<sub>2</sub>- Laserstrahlung*, VDI-Z, 133, 1991, Nr.6-Juni, pag.46-56.
127. Zheng, H.Y., ș.a., *Kerf scanning system for laser cutting quality control*, Lasers in Engineering, vol.1, no.1, 1991, pag.37-48.
128. \* \* \* *CILAS 2000 - Alcatel*, Cartea tehnică a utilajului.
129. \* \* \* *Emploi des faisceaux laser multikilowatts en soudage et en traitement thermique*, Cahiers Techniques Sciaky, no.13, 1983.
130. \* \* \* *NUM 750*, Manual de utilizare.
131. \* \* \* *STATGRAPHICS-Reference Manual*, Manugistic, 1992.
132. \* \* \* *II-VI Incorporated*, Optics Catalog, 1995.

### Observatii

1. Ulterior redactării tezei, lucrările menționate la pozițiile 29 și 33 din bibliografie, au fost acceptate la "ROMOPTO'97" urmând să fie publicate în volum SPIE-1998.
2. La sugestia referentului oficial dr.ing. Dan C. Dumitruș, au fost operate cu tuș negru corecturi la pag.: 11, 12, 15, 18 și 24.

## Anexa 1

### Determinarea fracțiunii $\eta$ din secțiunea fascicului laser care contribuie efectiv la încălzirea materialului

După cum reiese din cele prezentate în paragrafele 3.3.1, 3.4.1 și 3.5.1, datorită mișcării relative **FL-OP** în lungul traiectoriei, numai o parte,  $\eta$ , din secțiunea **FL** contribuie efectiv la încălzirea materialului, restul pierzându-se printre pereții tăieturii deja realizate. Pentru estimarea efectelor termice produse de **FL** asupra materialului, este necesară determinarea fracțiunii  $\eta$ , pe baza căreia să se estimeze energia efectiv absorbită de materialul **OP**.

Din soluția ecuației conducției termice (2.29), precum și din considerente geometrice fig.(A.1) [49] se pot defini următoarele mărimi adimensionale:

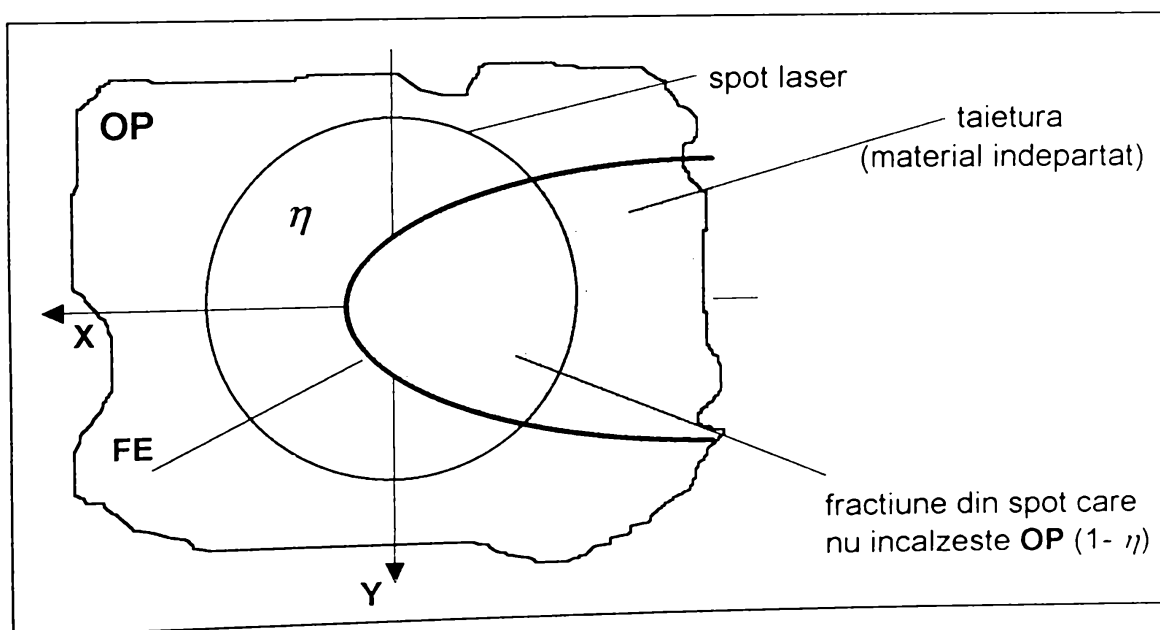


Fig.A.1

$$C_{\eta} = \frac{2\pi \cdot K \cdot s \cdot T_{CR}}{A \cdot P} \quad [-] \quad (A1.1)$$

$$S_{\eta} = \frac{v \cdot w_0}{2\kappa} \quad [-] \quad (A1.2)$$

$$X_{\eta} = \ln \frac{2C_{\eta}}{K_0(S_{\eta})} \quad [-] \quad (A1.3)$$



$$\theta_{\eta} = \arccos \frac{X_{\eta}}{S_{\eta}} \quad [-] \quad (A1.4)$$

toate mărimile ce intervin în ecuațiile de mai sus au fost definite în cap.3 din teză.

Apelând la relațiile (A1.1)...(A1.4), se poate scrie:

$$\eta = 1 - \frac{\theta_{\eta}}{\pi} + \frac{\sin(2\theta_{\eta})}{2\pi} - \frac{2}{\pi \cdot S_{\eta}^2} \cdot \int_0^{S_{\eta}} \sqrt{R^2 - (\ln X_{\eta})^2} \frac{K_1(R)}{K_0(R)} \cdot dR \quad [-] \quad (A1.5)$$

Calculule prezentate se bazează pe metodologia utilizată în lucrarea [49], aplicată, în vederea trasării curbelor din fig.A.2 și fig.A.3, la materialele studiate în teză și anume **PMMA** (fig.A.2) și respectiv **OL** (fig.A.3).

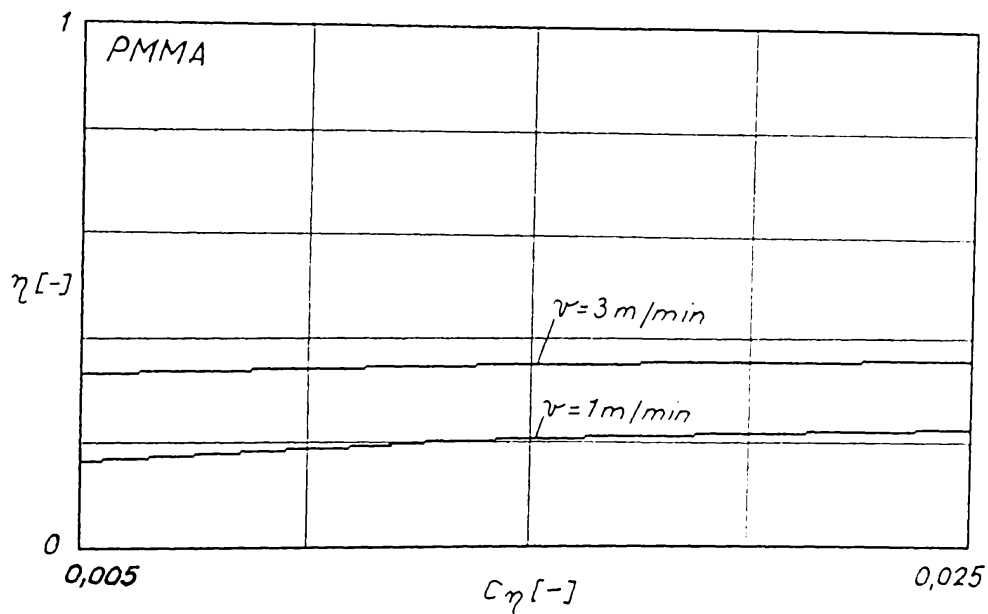


Fig.A.2

Pentru cazurile particulare ale **TL** a **PMMA** și **OL** (identificate prin constantele de material  $A$ ,  $K$ ,  $\kappa$  și prin  $T_{CR}$ ), precum și pentru viteze de tăiere  $v \in [1, 4]$  m/min, puteri laser  $P_L \in [100, 1500]$  W, grosimi ale **OP**  $s \in [1, 5]$  mm, și un diametru al **SL**,  $2W_0 = 0,2$  mm, care particularizează cazurile de interes practic prezentate în cap.3 și cap.4, valorile coeficientului  $\eta$  pot fi determinate funcție de mărimea  $C_{\eta}$ , din curbele trasate în fig.A.2 (pentru **OL**) și respectiv în fig.A.3 (pentru **PMMA**). Aceste curbe au fost trasate cu ajutorul programului MATHCAD, pe baza relației (A1.5). Valorile lui  $\eta$  determinate pe baza curbelor din fig.A.2 și fig.A.3 sunt utilizate în relațiile



(3.14), (3.34) si (3.40) pentru estimarea rezultatelor cu ajutorul modelelor analitice prezentate.

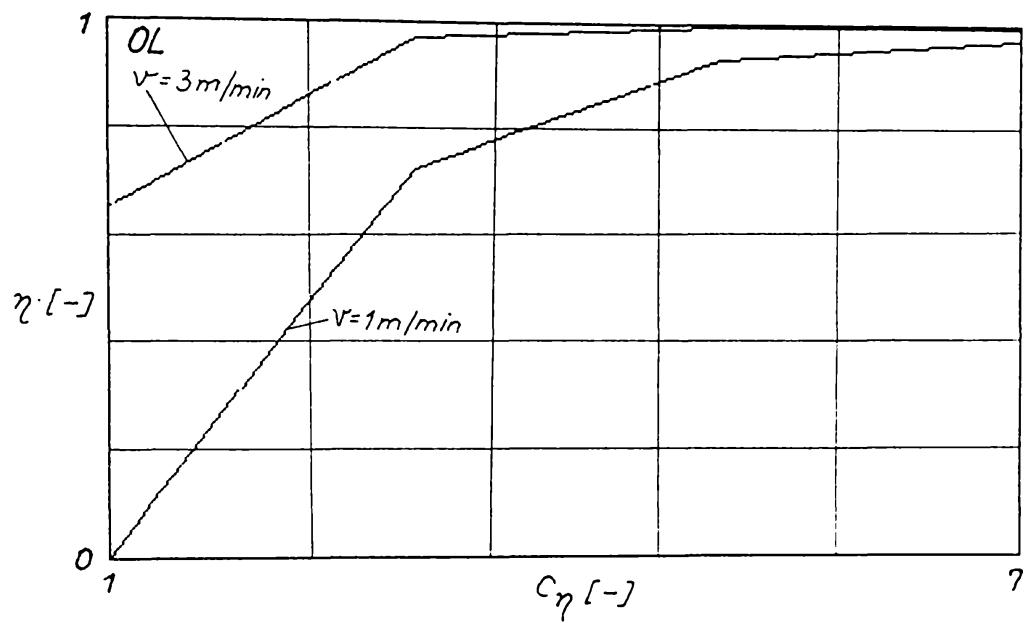


Fig.A.3

## Anexa 2

### Stabilirea semnificației statistice a influenței culorii PMMA asupra lățimii tăieturilor executate cu laseri CO<sub>2</sub> cw.

Scopul experimentului este acela de a evidenția semnificația statistică a culorii PMMA asupra lățimii tăieturilor executate cu laseri CO<sub>2</sub> cw, pentru a stabili dacă OP din PMMA de culori diferite (dar grosimi,  $s$ , egale) pot fi substituite unul altuia sau, dimpotrivă, în experimente, acest parametru trebuie luat în considerare ca FI semnificativ asupra lățimii tăieturilor, ca element al mulțimii  $\underline{T}$ .

Pentru atingerea scopului propus s-a ales metoda analizei dispersionale unifactoriale [29], frecvent utilizată la separarea influenței factorilor aleatori (neseemnificativi) de influența factorilor sistematici asupra unei FO (în această situație, lățimea tăieturii). Stabilirea semnificației unui FI se face prin descompunerea dispersiei totale a rezultatelor măsurărilor în componentele sale (aleatoare și sistematică) și compararea acestor componente cu ajutorul testului Fisher [84].

Pentru aplicarea metodei este necesară proiectarea corespunzătoare a experimentului, care presupune fixarea nivelelor FI analizat (culoarea PMMA) în număr de  $m$  și efectuarea a unui număr de  $n$  replici (tăieturi) pentru fiecare nivel, rezultând o matrice de valori  $m \times n$  determinate experimental și prezentate tabelar. Prelucrarea datelor experimentale se realizează pe baza unui algoritm de calcul prezentat în lucrările de specialitate [77],[84].

În particular, pentru realizarea experimentului, au fost alese ca OP plăcuțe de PMMA având grosimea  $s = 2.2$  mm și următoarele culori:

- roșu;
- portocaliu;
- incolor;
- alb,

rezultând astfel  $m = 4$ .

Numărul de replici pentru fiecare culoare a fost ales  $n = 5$ .

Caracteristicile instalației experimentale pe care s-au efectuat tăieturile sunt

prezentate în paragraful 4.2. În particular, pentru acest experiment au fost fixați, pe baza informațiilor apriori, următorii parametri, alături de  $s$ , ca fiind de interes practic:

- $P_L = 200$  W;
- $v = 3$  m/min;
- gaz de lucru :  $N_2$  ;
- $p = 1$  bar;
- poziție SL : pe suprafața superioară a OP;
- diametru duză gaz = 1 mm;
- formă traiectorie: rectilinie (fig. A.4).

Tăieturile au fost executate începând cu prima replică pentru fiecare culoare, apoi cea de-a doua replică pentru fiecare culoare, ș.a.m.d., obținându-se în final câte  $n = 5$  tăieturi de tipul celor prezentate în fig.A.4 pe fiecare OP.

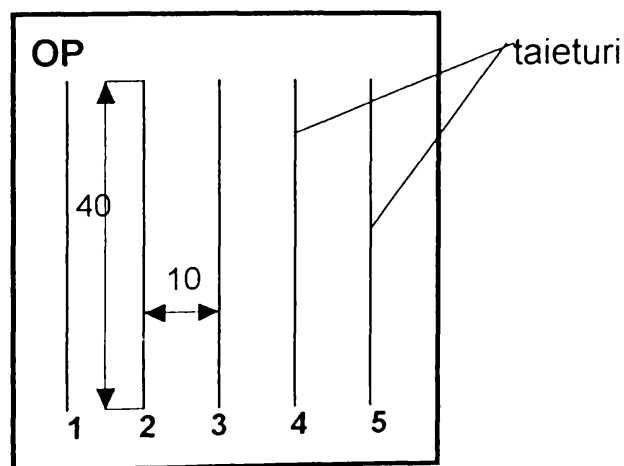


Fig.A.4

Ca FO aparținând mulțimii  $\underline{T}$  au fost alese (fig.4.8):

- $Y_{D1} = B \Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea superioară a OP;
- $Y_{D2} = b \Rightarrow$  lățimea tăieturii la partea inferioară a OP.

Valorile FO au fost determinate cu precizia de  $10^{-2}$  mm prin citirea la un microscop cu scală gradată și sunt prezentate pentru  $Y_{D1}$  în tab.A.1, iar pentru  $Y_{D2}$  în tab.A.2.

**Rezultatele măsurărilor pentru  $Y_{D1}$  [mm]**

Tabela A.1

Nr. replică n	Nivele ale FI (culorii), m			
	rosu = 1	portocaliu = 2	incolor = 3	alb = 4
1.	0,35	0,37	0,36	0,33
2.	0,37	0,35	0,38	0,33
3.	0,37	0,36	0,38	0,33
4.	0,35	0,38	0,37	0,34
5.	0,34	0,37	0,35	0,37

**Rezultatele măsurărilor pentru  $Y_{D2}$  [mm]**

Tabela A.2

Nr. replică n	Nivele ale FI (culorii), m			
	rosu = 1	portocaliu = 2	incolor = 3	alb = 4
1.	0,32	0,31	0,31	0,31
2.	0,30	0,29	0,32	0,31
3.	0,30	0,29	0,31	0,31
4.	0,32	0,32	0,30	0,30
5.	0,31	0,30	0,33	0,34

Prelucrarea datelor experimentale [29] a furnizat următoarea concluzie: deoarece între componentele aleatoare și sistematică ale dispersiei rezultatelor măsurărilor nu există diferențe semnificative, culoarea PMMA nu este un FI semnificativ. În condițiile de efectuare a experimentului, nici pentru FO  $Y_{D1}$  și nici pentru FO  $Y_{D2}$ . Rezultă că OP din PMMA de culori diferite pot fi substituie unul altuia în cazul TL.

### Anexa 3

#### Programe-sursă ale comenzii numerice NUM 750 folosite în vederea realizării experimentelor 1 și 2

##### *Experimentul 1*

% 001

N10	G90 G0 X00 Y00	N285	G91 G1 X0 Y5 F3000
N20	M54	N290	G91 G02 X-20 Y20 I0 J20 F3000
N30	M51 T21 M7	N300	M51 T51 M7
N31	M4 S1 M40	N301	M4 S1 M40
N40	S10 G4 F.1	N310	S1 G4 F.1
N50	G1 X0 Y40 F4000	N320	G91 G0 X0 Y20 F2000
N60	M51 T51 M7	N330	M51 T25 M7
N61	M4 S1 M40	N331	M4 S1 M40
N70	S1 G4 F.1	N340	S8 G4 F.1
N80	G91 G0 Y60 F4000	N350	G91 G1 X0 Y35 F2000
N90	M51 T21 M7	N355	M00
N91	M4 S1 M40	N360	M51 T51 M7
N100	S8 G4 F.1	N370	S1 G4 F.1
N110	G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000	N380	G91 G0 X0 Y90 F4000
N115	M00	N390	M51 T24 M7
N120	M51 T51 M7	N391	M4 S1 M40
N121	M4 S1 M40	N400	S7 G4 F.1
N130	S1 G4 F.1	N410	G91 G1 X0 Y30 F4000
N140	G91 G0 X0 Y90 F1000	N420	M51 T51 M7
N150	M51 T22 M7	N421	M4 S1 M40
N151	M4 S1 M40	N430	S1 G4 F.1
N160	S7 G4 F.1	N440	G91 G0 X0 Y10 F3000
N170	G91 G02 X-20 Y20 I0 J20 F1000	N450	G91 G0 X50 Y0 F3000
N171	G91 G0 X0 Y5 F1000	N460	M51 T24 M7
N180	M51 T51 M7	N461	M4 S1 M40
N181	M4 S1 M40	N470	S7 G4 F.1
N190	S1 G4 F.1	N480	G91 G01 X0 Y-10 F3000
N200	G91 G0 X0 Y20 F1000	N490	G91G02 X-20 Y-20 I-20 J10 F3000
N210	M51 T23 M7	N495	M00
N211	M4 S1 M40	N500	M51 T51 M7
N220	S5 G4 F.1	N501	M4 S1 M40
N225	G91 G1 X0 Y5 F1000	N510	S1 G4 F.1
N230	G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000	N520	G91 G0 X0 Y-105 F2000
N235	M00	N530	M51 T25 M7
N240	M51 T51 M7	N531	M4 S1 M40
N241	M4 S1 M40	N540	S5 G4 F.1
N250	S1 G4 F.1	N550	G91 G01 X0 Y-30 F2000
N260	G91 G0 X0 Y25 F3000	N560	M51 T51 M7
N270	M51 T22 M7	N561	M4 S1 M40
N271	M4 S1 M40	N570	S1 G4 F.1
N280	S10 G4 F.1	N580	G91 G0 X0 Y-270 F4000

N590 M51 T21 M7  
N591 M4 S1 M40  
N600 S8 G4 F.1  
N610 G91 G01 X0 Y-30 F4000  
N615 M00  
N620 M51 T51 M7  
N621 M4 S1 M40  
N630 S1 G4 F.1  
N640 G91 G0 X0 Y-45 F4000  
N650 G91 G0 X60 Y0 F4000  
N660 M51 T21 M7  
N661 M4 S1 M40  
N670 S10 G4 F.1  
N680 G91 G01 X0 Y10 F1000  
N690 G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000  
N700 M51 T51 M7  
N701 M4 S1 M40  
N710 S1 G4 F.1  
N720 G91 G0 X0 Y70 F2000  
N730 M51 T21 M7  
N731 M4 S1 M40  
N740 S10 G4 F.1  
N750 G91 G03 X-20 Y20 I-20 J0 F2000  
N755 M00  
N760 M51 T51 M7  
N761 M4 S1 M40  
N770 S1 G4 F.1  
N780 G91 G0 X0 Y90 F4000  
N790 M51 T21 M7  
N791 M4 S1 M40  
N800 S8 G4 F.1  
N810 G91 G01 X0 Y30 F4000  
N820 M51 T51 M7  
N821 M4 S1 M40  
N830 S1 G4 F.1  
N840 G91 G0 X0 Y15 F2000  
N850 M51 T23 M7  
N851 M4 S1 M40  
N860 S7 G4 F.1  
N865 G91 G01 X0 Y5 F2000  
N870 G91 G02 X20 I20 J0 F2000  
N875 M00  
N880 M51 T51 M7  
N881 M4 S1 M40  
N890 S1 G4 F.1  
N900 G91 G0 X0 Y50 F3000  
N910 G91 G0 X10 Y0 F3000  
N920 M51 T22 M7  
N921 M4 S1 M40  
N930 S5 G4 F.1

N940 G91 G01 X0 Y-40 F3000  
N950 M51 T51 M7  
N951 M4 S1 M40  
N960 S1 G4 F.1  
N970 G91 G0 X0 Y-210 F3000  
N980 M51 T21 M7  
N981 M4 S1 M40  
N990 S5 G4 F.1  
N1000 G91 G01 X0 Y-40 F3000  
N1005 M02

## Experimental 2

% 002

N10	G90 G0 X00 Y00	N330	M51 T21 M7
N20	M54	N331	M4 S1 M40
N30	M51 T20 M7	N340	S24 G4 F.1
N31	M4 S1 M40	N350	G91 G1 X0 Y35 F2000
N40	S29 G4 F.1	N355	M00
N50	G1 X0 Y40 F4000	N360	M51 T51 M7
N60	M51 T51 M7	N370	S1 G4 F.1
N61	M4 S1 M40	N380	G91 G0 X0 Y90 F4000
N70	S1 G4 F.1	N390	M51 T21 M7
N80	G91 G0 Y60 F4000	N391	M4 S1 M40
N90	M51 T20 M7	N400	S20 G4 F.1
N91	M4 S1 M40	N410	G91 G1 X0 Y30 F4000
N100	S24 G4 F.1	N420	M51 T51 M7
N110	G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000	N421	M4 S1 M40
N115	M00	N430	S1 G4 F.1
N120	M51 T51 M7	N440	G91 G0 X0 Y10 F3000
N121	M4 S1 M40	N450	G91 G0 X50 Y0 F3000
N130	S1 G4 F.1	N460	M51 T21 M7
N140	G91 G0 X0 Y90 F1000	N461	M4 S1 M40
N150	M51 T21 M7	N470	S20 G4 F.1
N151	M4 S1 M40	N480	G91 G01 X0 Y-10 F3000
N160	S20 G4 F.1	N490	G91G02 X-20 Y-20 I-20 J10 F3000
N170	G91 G02 X-20 Y20 I0 J20 F1000	N495	M00
N171	G91 G0 X0 Y5 F1000	N500	M51 T51 M7
N180	M51 T51 M7	N501	M4 S1 M40
N181	M4 S1 M40	N510	S1 G4 F.1
N190	S1 G4 F.1	N520	G91 G0 X0 Y-105 F2000
N200	G91 G0 X0 Y20 F1000	N530	M51 T21 M7
N210	M51 T21 M7	N531	M4 S1 M40
N211	M4 S1 M40	N540	S16 G4 F.1
N220	S16 G4 F.1	N550	G91 G01 X0 Y-30 F2000
N225	G91 G1 X0 Y5 F1000	N560	M51 T51 M7
N230	G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000	N561	M4 S1 M40
N235	M00	N570	S1 G4 F.1
N240	M51 T51 M7	N580	G91 G0 X0 Y-270 F4000
N241	M4 S1 M40	N590	M51 T20 M7
N250	S1 G4 F.1	N591	M4 S1 M40
N260	G91 G0 X0 Y25 F3000	N600	S24 G4 F.1
N270	M51 T21 M7	N610	G91 G01 X0 Y-30 F4000
N271	M4 S1 M40	N615	M00
N280	S29 G4 F.1	N620	M51 T51 M7
N285	G91 G1 X0 Y5 F3000	N621	M4 S1 M40
N290	G91 G02 X-20 Y20 I0 J20 F3000	N630	S1 G4 F.1
N300	M51 T51 M7	N640	G91 G0 X0 Y-45 F4000
N301	M4 S1 M40	N650	G91 G0 X60 Y0 F4000
N310	S1 G4 F.1	N660	M51 T20 M7
N320	G91 G0 X0 Y20 F2000	N661	M4 S1 M40

N670 S29 G4 F.1  
N680 G91 G01 X0 Y10 F1000  
N690 G91 G02 X20 Y20 I20 J0 F1000  
N700 M51 T51 M7  
N701 M4 S1 M40  
N710 S1 G4 F.1  
N720 G91 G0 X0 Y70 F2000  
N730 M51 T20 M7  
N731 M4 S1 M40  
N740 S29 G4 F.1  
N750 G91 G03 X-20 Y20 I-20 J0 F2000  
N755 M00  
N760 S1 T51 M7  
N761 M4 S1 M40  
N770 S1 G4 F.1  
N780 G91 G0 X0 Y90 F4000  
N790 M51 T20 M7  
N791 M4 S1 M40  
N800 S24 G4 F.1  
N810 G91 G01 X0 Y30 F4000  
N820 M51 T51 M7  
N821 M4 S1 M40  
N830 S1 G4 F.1  
N840 G91 G0 X0 Y15 F2000  
N850 M51 T21 M7  
N851 M4 S1 M40  
N860 S20 G4 F.1  
N865 G91 G01 X0 Y5 F2000  
N870 G91 G02 X20 I20 J0 F2000  
N875 M00  
N880 M51 T51 M7  
N881 M4 S1 M40  
N890 S1 G4 F.1  
N900 G91 G0 X0 Y50 F3000  
N910 G91 G0 X10 Y0 F3000  
N920 M51 T20 M7  
N921 M4 S1 M40  
N930 S16 G4 F.1  
N940 G91 G01 X0 Y-40 F3000  
N950 M51 T51 M7  
N951 M4 S1 M40  
N960 S1 G4 F.1  
N970 G91 G0 X0 Y-210 F3000  
N980 M51 T20 M7  
N981 M4 S1 M40  
N990 S16 G4 F.1  
N1000 G91 G01 X0 Y-40 F3000  
N1005 M02



## Anexa 4

### Programe-sursă ale comenzii numerice NUM 750 folosite în vederea realizării experimentelor 3 și 4

#### Experimentul 3

% 003

N10	G90 G0 X00 Y00	N290	G91 G1 X0 Y-60 F3000
N20	M54	N300	M51 T51 M7
N21	M51 T51 M7	N301	M4 S1 M40
N22	M4 S1 M40	N310	S1 G4 F.1
N23	S1 G4 F.1	N320	G91 G0 X0 Y-95 F1000
N24	G0 X0 Y245 F3000	N330	M51 T23 M7
N30	M51 T25 M7	N331	M4 S1 M40
N31	M4 S1 M40	N340	S10 G4 F.1
N40	S10 G4 F.1	N350	G91 G1 X0 Y-60 F1000
N50	G91 G1 X0 Y60 F3000	N360	M51 T51 M7
N60	M51 T5 M7	N361	M4 S1 M40
N61	M4 S1 M40	N370	S1 G4 F.1
N70	S1 G4 F.1	N380	G91 G0 X20 Y0 F3000
N80	G91 G0 X0 Y63 F1000	N390	M51 T23 M7
N90	M51 T25 M7	N391	M4 S1 M40
N91	M4 S1 M40	N400	S7 G4 F.1
N100	S10 G4 F.1	N410	G91 G1 X0 Y60 F3000
N110	G91 G1 X0 Y60 F1000	N420	M51 T51 M7
N120	M51 T51 M7	N421	M4 S1 M40
N121	M4 S1 M40	N430	S1 G4 F.1
N130	S1 G4 F.1	N440	G91 G0 X0 Y95 F1000
N140	G91 G0 X20 Y0 F3000	N450	M51 T23 M7
N150	M51 T25 M7	N451	M4 S1 M40
N151	M4 S1 M40	N460	S7 G4 F.1
N160	S7 G4 F.1	N470	G91 G1 X0 Y60 F1000
N170	G91 G1 X0 Y-60 F3000	N480	M51 T51 M7
N180	M51 T51 M7	N481	M4 S1 M40
N181	M4 S1 M40	N490	S1 G4 F.1
N190	S1 G4 F.1	N500	G91 G0 X0 Y30 F3000
N200	G91 G0 X0 Y-63 F1000	N510	M51 T24 M7
N210	M51 T25 M7	N511	M4 S1 M40
N211	M4 S1 M40	N520	S10 G4 F.1
N220	S7 G4 F.1	N530	G91 G1 X0 Y60 F3000
N230	G91 G1 X0 Y-60 F1000	N540	M51 T51 M7
N240	M51 T51 M7	N541	M4 S1 M40
N241	M4 S1 M40	N550	S1 G4 F.1
N250	S1 G4 F.1	N560	G91 G0 X0 Y63 F1000
N260	G91 G0 X0 Y-30 F3000	N570	M51 T24 M7
N270	M51 T23 M7	N571	M4 S1 M40
N271	M4 S1 M40	N580	S10 G4 F.1
N280	S10 G4 F.1	N590	G91 G1 X0 Y60 F1000

N600 M51 T51 M7  
N601 M4 S1 M40  
N610 S1 G4 F.1  
N620 G91 G0 X20 Y0 F3000  
N630 M51 T24 M7  
N631 M4 S1 M40  
N640 S7 G4 F.1  
N650 G91 G1 X0 Y-60 F3000  
N660 M51 T51 M7  
N661 M4 S1 M40  
N670 S1 G4 M.1  
N680 G91 G0 X0 Y-63 F1000  
N690 M51 T24 M7  
N691 M4 S1 M40  
N700 S7 G4 F.1  
N710 G91 G1 X0 Y-60 F1000  
N720 M51 T51 M7  
N721 M4 S1 M40  
N730 S1 G4 M.1  
N740 G91 G0 X0 Y-30 F3000  
N750 M51 T22 M7  
N751 M4 S1 M40  
N760 S10 G4 F.1  
N770 G91 G1 X0 Y-60 F3000  
N780 M51 T51 M7  
N781 M4 S1 M40  
N790 S1 G4 M.1  
N800 G91 G0 X0 Y-95 F1000  
N810 M51 T22 M7  
N811 M4 S1 M40  
N820 S10 G4 F.1  
N830 G91 G1 X0 Y-60 F1000  
N840 M51 T51 M7  
N841 M4 S1 M40  
N850 S1 G4 M.1  
N860 G91 G0 X20 Y0 F3000  
N870 M51 T22 M7  
N871 M4 S1 M40  
N880 S7 G4 F.1  
N890 G91 G1 X0 Y60 F3000  
N900 M51 T51 M7  
N901 M4 S1 M40  
N910 S1 G4 M.1  
N920 G91 G0 X0 Y95 F1000  
N930 M51 T22 M7  
N931 M4 S1 M40  
N940 S7 G4 F.1  
N950 G91 G1 X0 Y60 F1000  
N960 M51 T51 M7  
N970 M4 S1 M40

N980 S1 G4 M1  
N990 G91 G0 X0 Y30 F3000  
N1000 M00  
N1001 G77 N30 N950 S1  
N1010 M02

*Experimental 4*

%004

N10	G90 G0 X00 Y00	N330	M51 T21 M7
N20	M54	N331	M4 S1 M40
N21	M51 T51 M7	N340	S24 G4 F.1
N22	M4 S1 M40	N350	G91 G1 X0 Y-35 F1000
N23	S1 G4 F.1	N360	M51 T51 M7
N24	G0 X0 Y115 F3000	N361	M4 S1 M40
N30	M51 T22 M7	N370	S1 G4 F.1
N31	M4 S1 M40	N380	G91 G0 X20 Y0 F3000
N40	S24 G4 F.1	N390	M51 T21 M7
N50	G91 G1 X0 Y35 F3000	N391	M4 S1 M40
N60	M51 T5 M7	N400	S16 G4 F.1
N61	M4 S1 M40	N410	G91 G1 X0 Y35 F3000
N70	S1 G4 F.1	N420	M51 T51 M7
N80	G91 G0 X0 Y20 F1000	N421	M4 S1 M40
N90	M51 T22 M7	N430	S1 G4 F.1
N91	M4 S1 M40	N440	G91 G0 X0 Y15 F1000
N100	S24 G4 F.1	N450	M51 T21 M7
N110	G91 G1 X0 Y35 F1000	N451	M4 S1 M40
N120	M51 T51 M7	N460	S16 G4 F.1
N121	M4 S1 M40	N470	G91 G1 X0 Y35 F1000
N130	S1 G4 F.1	N480	M51 T51 M7
N140	G91 G0 X20 Y0 F3000	N481	M4 S1 M40
N150	M51 T22 M7	N490	S1 G4 F.1
N151	M4 S1 M40	N500	G91 G0 X0 Y30 F3000
N160	S16 G4 F.1	N510	M51 T21 M7
N170	G91 G1 X0 Y-35 F3000	N511	M4 S1 M40
N180	M51 T51 M7	N520	S24 G4 F.1
N181	M4 S1 M40	N530	G91 G1 X0 Y35 F3000
N190	S1 G4 F.1	N540	M51 T51 M7
N200	G91 G0 X0 Y-20 F1000	N541	M4 S1 M40
N210	M51 T22 M7	N550	S1 G4 F.1
N211	M4 S1 M40	N560	G91 G0 X0 Y20 F1000
N220	S16 G4 F.1	N570	M51 T21 M7
N230	G91 G1 X0 Y-35 F1000	N571	M4 S1 M40
N240	M51 T51 M7	N580	S24 G4 F.1
N241	M4 S1 M40	N590	G91 G1 X0 Y35 F1000
N250	S1 G4 F.1	N600	M51 T51 M7
N260	G91 G0 X0 Y-30 F3000	N601	M4 S1 M40
N270	M51 T21 M7	N610	S1 G4 F.1
N271	M4 S1 M40	N620	G91 G0 X20 Y0 F3000
N280	S24 G4 F.1	N630	M51 T21 M7
N290	G91 G1 X0 Y-35 F3000	N631	M4 S1 M40
N300	M51 T51 M7	N640	S16 G4 F.1
N301	M4 S1 M40	N650	G91 G1 X0 Y-35 F3000
N310	S1 G4 F.1	N660	M51 T51 M7
N320	G91 G0 X0 Y-15 F1000	N661	M4 S1 M40

N670 S1 G4 M.1  
N680 G91 G0 X0 Y-15 F1000  
N690 M51 T21 M7  
N691 M4 S1 M40  
N700 S16 G4 F.1  
N710 G91 G1 X0 Y-35 F1000  
N720 M51 T51 M7  
N721 M4 S1 M40  
N730 S1 G4 M.1  
N740 G91 G0 X0 Y-30 F3000  
N750 M51 T20 M7  
N751 M4 S1 M40  
N760 S24 G4 F.1  
N770 G91 G1 X0 Y-35 F3000  
N780 M51 T51 M7  
N781 M4 S1 M40  
N790 S1 G4 M.1  
N800 G91 G0 X0 Y-15 F1000  
N810 M51 T20 M7  
N811 M4 S1 M40  
N820 S24 G4 F.1  
N830 G91 G1 X0 Y-35 F1000  
N840 M51 T51 M7  
N841 M4 S1 M40  
N850 S1 G4 M.1  
N860 G91 G0 X20 Y0 F3000  
N870 M51 T20 M7  
N871 M4 S1 M40  
N880 S16 G4 F.1  
N890 G91 G1 X0 Y35 F3000  
N900 M51 T51 M7  
N901 M4 S1 M40  
N910 S1 G4 M.1  
N920 G91 G0 X0 Y15 F1000  
N930 M51 T20 M7  
N931 M4 S1 M40  
N940 S16 G4 F.1  
N950 G91 G1 X0 Y35 F1000  
N960 M51 T51 M7  
N970 M4 S1 M40  
N980 S1 G4 M1  
N990 G91 G0 X0 Y30 F3000  
N1000 M00  
N1001 G77 N30 N950 S1  
N1010 M02