

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA

FACULTATEA DE MECANICA

ing. ION DAVID

Cercetări privind parametrii tehnologici la prelucrarea
cu laser a microsuprafețelor și interdependența acestora
cu materialul supus prelucrării

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

pentru obținerea titlului științific de doctor inginer

Conducător științific

Prof. em. dr. ing. GHEORGHE SAVII

- 1985 -

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA	
495600	
Volumul	354
Dulap	G

C U P R I N S

	pag
1. INTRODUCERE	1
2. UNELE CONSIDERATII PRIVIND CONSTRUCTIA SI UTILIZAREA GENERATOARELOR SI AMPLIFICATOARELOR CUANTICE IN DOMENIUL PRELUCRARII DIMENSIONALE	5
3. INTERACTIUNEA RADIATIEI LASER FOCALIZATE CU MATERIALUL SUPUS PRELUCRARII.....	19
3.1. Considerații generale	19
3.2. Faza de absorbție a radiației laser de către materie.....	26
3.3. Prelevarea de material cu fascicul laser focalizat.....	31
3.3.1. Incălzirea materialului.....	31
3.3.2. Topirea și vaporizarea materialului.....	32
3.3.3. Indepărtarea fazei lichide.....	35
3.3.4. Indepărtarea fazei gazoase.....	38
4. APARATURA EXPERIMENTALA UTILIZATA LA PRELUCRAREA DIMENSIONALA CU FASCICUL LASER FOCALIZAT.....	45
4.1. Generatoare și amplificatoare cuantice pe care s-au realizat experimentările	46
4.1.1. Instalația laser "Neodim 15".....	47
4.1.2. Laserul cu bioxid de carbon multimod FC 100	50
4.1.3. Laserul cu CO ₂ monomod LIR 100.....	52
4.1.4. Laserul cu bioxid de carbon cu circula- ție transversală a amestecului	55
4.2. Contribuții la proiectarea și construcția unor dispozitive necesare echipării instalațiilor laser utilizate	58
4.2.1. Unele aspecte privind proiectarea dispozitivelor de prelucrare cu laser asistat de jet de gaz.....	58
4.2.1.1. Alegerea lentilei de focalizare.	59
4.2.1.2. Alegerea formei și dimensiu- nilor duzei de suflare a gazului ajutător.....	64

	pag.
4.2.2. Dispozitiv de tăiere cu laser asistat de jet de gaz pentru instalația FC 100 ...	68
4.2.3. Dispozitiv pentru tăiere, sudare și tratament termic destinat instalației laser cu circulație transversală	71
4.2.4. Dispozitiv pentru tăiere și fracturare controlată la instalația laser LIR 100 ...	74
4.2.5. Dispozitiv de prelucrare cu gaz ajutător preîncălzit	75
4.3. Considerații finale.....	77
5. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENTA PARAMETRILOR PROCESULUI ASUPRA CARACTERIS- TICILOR DE PRELUCRARE LA GAURIREA CU AJUTORUL LASERULUI.....	78
5.1. Parametri tehnologici la prelucrarea cu laserul "Neodim 15" a orificiilor în oțel inoxidabil 20 Cr 130 STAS 3583/80.....	78
5.2. Stabilirea ordinii de importanță a para- metrilor asupra funcțiilor de răspuns prin metoda bilanțului aleator	81
5.2.1. Stabilirea matricii de experimentare.....	81
5.2.2. Criteriile de performanță și modul de realizare a experimentărilor.....	84
5.2.3. Program de calcul pentru aplicarea metodei bilanțului aleator.....	88
5.2.4. Aprecieri cu privire la rezultatele obținute.....	93
5.3. Modelarea matematică a procesului tehnologic de prelucrare.....	97
5.3.1. Modelul matematic general pentru o funcție cu mai multe variabile indepen- dente.....	98
5.3.2. Experimentul factorial.....	99
5.3.3. Determinarea polinoamelor funcțiilor de răspuns prin analiza de regresie.....	102
5.3.3.1. Testarea datelor experimentale..	102
5.3.3.2. Calculul coeficienților de regresie	106

	pag.
5.3.3.3. Testarea semnificației coeficientilor de regresie	107
5.3.3.4. Verificarea adecvantei modelului matematic.....	107
5.4. Analiza rezultatelor obținute prin modelare matematică.....	111
5.5. Unele aspecte privind influența fascicului laser asupra zonelor marginale ale microalezelor prelucrate cu laser în oțelul 20 Cr 130....	126
5.5.1. Pregătirea probelor metalografice.....	127
5.5.2. Aprecieri cu privire la transformările ce apar în zonele afectate de fasciculul laser.....	129
5.6. Câteva considerații finale privind prelucrarea cu ajutorul laserului a orificiilor în oțel inoxidabil 20 Cr.130.....	135
6. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND TAIEREA CU LASER A UNOR MATERIALE METALICE SI NEMETALICE	137
6.1. Stabilirea regimului de tăiere cu laser și jet de gaz ajutător.....	138
6.2. Unele rezultate experimentale la tăierea cu laser a oțelurilor.....	142
6.3. Aspecte tehnologice la prelucrarea materialelor nemetalice.....	150
6.3.1. Materialele lemnoase.....	150
6.3.1.1. Prelucrarea furnirelor.....	151
6.3.1.2. Prelucrarea placajului din fag de 5 mm grosime.....	156
6.3.1.3. Prelucrarea plăcilor fibrolemnoase emailate.....	158
6.3.1.4. Unele concluzii privind tăierea cu laser a materialelor lemnoase.....	159
6.3.2. Prelucrarea cu laser a sticloteolitului.....	160
6.3.3. Unele aspecte privind fracturarea controlată a sticlelor industriale cu ajutorul laserului.....	164
7. CONCLUZII.....	170
8. BIBLIOGRAFIE.....	174

1. INTRODUCERE

Realizarea societății socialiste multilateral dezvoltate nu poate fi concepută fără cele mai noi cuceriri ale revoluției tehnico-științifice, fără asigurarea unei productivități ridicate și a unor produse cu calități și performanțe deosebite.

Așa cum reiese din documentele programatice ale P.C.R. /22,116,117/, una din sarcinile de bază trasate științei și tehnicii românești o constituie permanenta perfecționare a tehnologiilor de prelucrare, creerea și aplicarea în industrie a noilor tehnologii. Printre acestea, realizate relativ recent, se află și procedeele de prelucrare neconvenționale. Aceste tehnologii sînt în prezent din ce în ce mai mult aplicate la prelucrarea dimensională a unor organe de mașini care sînt confecționate din materiale dure și superdure, a unor piese de configurație deosebit de complicată etc.

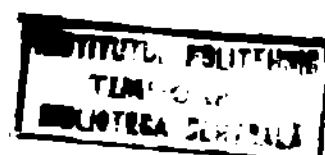
Tehnologiile neconvenționale de prelucrare a materialelor și utilajele aferente acestor tehnologii, au cunoscut și cunosc în ultimii ani un ritm de dezvoltare fără precedent.

Printre procedeele neconvenționale de prelucrare a materialelor, cu dată relativ recentă, se află și prelucrarea cu ajutorul fasciculului laser.

Știința și tehnica universală nu cunoaște pînă în prezent vreo invenție sau descoperire care să fi avut implicații atât de vaste, în toate ramurile de activitate umană, cum este laserul.

Prin faptul că laserul aduce soluții spectaculoase la rezolvarea diverselor probleme pe care le pune actuala revoluție tehnico-științifică, în domeniul tehnologiilor industriale, comunicațiilor, energiei, sănătății etc., eforturile materiale și umane ce se fac pentru dezvoltarea acestui domeniu sînt justificente.

Utilizat astăzi în toate domeniile de activitate, laserul deschide noi perspective, noi posibilități privind înlocuirea unor tehnologii perimate, creerea de noi tehnologii de mare productivitate și eficiență economică sporită.



Apărut ca rezultat al cercetărilor din domeniul fizicii, laserul, prin proprietățile sale deosebite a devenit astăzi un instrument tehnologic de mare eficiență. Industriile avansate au înțeles pe deplin că este în interesul lor de a folosi această nouă descoperire științifică, astfel că, implementarea laserilor în procesul de producție al bunurilor materiale s-a făcut cu mare rapiditate.

De la realizarea primului laser românesc la Institutul de fizică atomică din București sub conducerea profesorului Ion I. Agârbiceanu (1962) și pînă în prezent, cercetarea științifică în domeniul laserilor a cunoscut și în țara noastră, o largă dezvoltare. Există astăzi, în cadrul acestui institut (IFTAR), o secție specializată în domeniul cercetării și realizării instalațiilor laser.

Prelucrările dimensionale care se pot realiza cu ajutorul laserului prezintă o deosebită importanță pentru domeniul industriei constructoare de mașini și aparate, al industriei ușoare, existînd perspective largi pentru utilizarea radiației laser la debitare, tăiere profilată, găurire, fracturare, sudare etc.

Domeniile în care prelucrarea cu laser prezintă avantaje superioare altor tehnologii sînt acelea în care laserul poate acționa mai eficient sau acolo unde, operația respectivă se poate efectua numai cu ajutorul laserului.

Cu toate că acest nou procedeu de prelucrare a diverselor materiale se aplică în diverse tehnologii, rezultatele obținute sînt doar parțial prezentate în literatură, deseori ele fiind contradictorii.

Datorită aplicării încă restrînse, în țara noastră, a acestei tehnologii, datele oferite de practică sînt foarte puține și neconcludente, ele referindu-se la condițiile specifice în care se exploatează instalația laser respectivă.

Cu toate acestea, se constată că există un interes tot mai larg manifestat de unele întreprinderi, cu privire la posibilitatea înlocuirii unor tehnologii clasice prin tehnologie de prelucrare cu laser. În acest context, au fost abordate studiile privind prelucrarea microalezajelor și tăierea unor materiale greu prelucrabile prin procedee clasice, în vederea stabilirii parametrilor optimi și a productivității procedurii.

Unele din cercetările cuprinse în prezenta lucrare au la

bază solicitări ale unor întreprinderi industriale din țară, solicitări ce s-au materializat pe baza unor contracte de cercetare științifică încheiate și rezolvate cu rezultate promițătoare.

S-a dovedit astfel eficiența deosebită a tehnologiei de prelucrare cu laser în obținerea intarsiilor de la obiectele de mobilier (I.P.L.Timișoara); în domeniul fracturării controlate a obiectelor din sticlă industrială (Întreprinderea de Sticlă Tomești) sau la debitarea materialelor cu inserție din fibre de sticlă (Întreprinderea Electroputere Craiova)etc.

Pornind de la faptul că există la noi în țară un institut specializat în producerea de generatoare și amplificatoare cuantice, și că preocupările legate de implementarea acestor instalații în procesul de producție sînt încă sub nivelul tehnicii mondiale; atît datorită inerției manifestate de unele întreprinderi cît și datorită necunoașterii avantajelor tehnologiilor laser, prezenta lucrare de doctorat și-a propus să prezinte unele din posibilitățile instalațiilor laser românești în domeniul prelucrării dimensionale a materialelor.

Instalațiile laser destinate prelucrărilor de materiale produse de IFTAR București (singurul producător de lasere românești) sînt modele experimentale, uneori aparate realizate într-o serie de doar cîteva bucăți. Ele nu sînt fabricate pentru o anumită destinație și deci nu sînt echipate cu dispozitive de prelucrare corespunzătoare. Din aceste considerente s-a impus conceperea și realizarea unor astfel de dispozitive, dispozitive cu un grad ridicat de universalitate pentru a oferi posibilitatea testării prelucrabilității unei game cît mai extinse de materiale.

Rezultatele privind prelucrabilitatea diverselor materiale au fost obținute exclusiv pe instalații produse de IFTAR București. Realizarea experimentărilor a fost posibilă datorită existenței unei baze materiale corespunzătoare, bază asigurată prin creerea unui laborator laser în cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara.

Teza de doctorat este organizată pe 7 capitole, are o extensie de 182 pagini cu 79 figuri, 32 tabele, și cuprinde 118 referiri bibliografice din care 12 sînt lucrări publicate sau comunicate de autor singur și în colaborare.

În prima parte (cap.2) sînt prezentate sintetic unele considerații referitoare la stadiul actual al construcției și utilizării generatoarelor și amplificatoarelor cuantice.

În capitolul 3 s-au sistematizat, într-o viziune originală, principalele cunoștințe fundamentale în domeniul interacțiunii radiației laser focalizate cu materialul supus prelucrării. S-au analizat principalele faze ale acestui proces de interacțiune considerînd drept obiect al prelucrării un material metalic.

Capitolul 4 însumează realizările din domeniul proiectării și construcției dispozitivelor necesare echipării instalațiilor laser utilizate în procesul de prelucrare al materialelor, dispozitive proiectate și realizate de către autor.

Capitolul 5 oferă un studiu privind influența regimului de lucru asupra parametrilor preciziei de prelucrare și al productivității procedurii la găurirea cu laser a oțelului 20 Cr 130. Sînt analizați parametrii preciziei de dimensiune și de formă geometrică a alezajului obținut prin găurire cu fascicul laser, urmărindu-se de asemenea influența pe care laserul o are asupra zonei marginale a orificiului.

În capitolul 6 se prezintă cercetările teoretice și experimentale efectuate de autor în domeniul tăierii cu laser a materialelor.

Unele din rezultatele acestor cercetări, așa după cum s-a mai arătat, derivă din solicitările industriei, ele punînd la dispoziția acesteia o tehnologie cu posibilitate de aplicare imediată.

În capitolul de concluzii se prezintă principalele contribuții originale aduse de autor în domeniul cercetării teoretice și experimentale.

Cu prilejul finalizării lucrării, autorul își exprimă profunda prețuire și recunoștință față de conducătorul științific, prof.emerit dr.ing.Gheorghe Savii, pentru competența cu care l-a îndrumat în toată perioada de elaborare a acestei lucrări. De asemenea, mulțumește conducerii catedrei de Tehnologie Mecanică, tuturor colegilor de la catedrele de Tehnologie Mecanică și Tehnologia Construcțiilor de Mașini care l-au sprijinit în perioada elaborării prezentei lucrări. Autorul aduce calde mulțumiri conducerii secției "Lasere" de la I.F.T.A.R. București precum și tuturor colegilor de la acest institut care l-au sprijinit în asigurarea bunei funcționări a instalațiilor utilizate, precum și în realizarea efectivă a unora dintre experimentări.

2. UNELE CONSIDERATII PRIVIND CONSTRUCTIA SI
UTILIZAREA GENERATOARELOR SI AMPLIFICATOARELOR
CUANTICE IN DOMENIUL PRELUCRARI
DIMENSIONALE

Dacă în primii 20 de ani de existență laserii au fost folosiți în cea mai mare parte în aplicații experimentale cu domeniu deosebit de specializat, astăzi, prin nivelul ridicat de energie la care s-a ajuns în construcția acestora, prin gradul ridicat de automatizare al comenzilor, laserii sînt larg utilizați în aplicații industriale, mergînd de la tăierea foiței de hîrtie și pînă la sudarea navelor.

Efectul laser se obține astăzi din mai bine de 1000 de materiale, diversitatea instalațiilor construite fiind impresionantă.

În domeniul prelucrării de materiale se utilizează însă cu succes doar două tipuri de lasere : cele cu mediu activ format din $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ ce emit radiația infraroșie cu $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ și cele cu mediu activ solid (YAG + Nd^{3+}), ce emit radiația cu $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$.

Se construiesc astăzi laseri cu CO_2 cu putere de peste 20KW al căror randament este de peste 10%. Acești laseri de mare putere pot fi clasificați în trei grupe distincte /57/:

Grupa I-a - cuprinde laserii convenționali cu tub de descărcare la care răcirea amestecului activ se realizează cu un agent de răcire ce spală pereții exteriori ai tubului de descărcare. Se știe că laserii cu CO_2 nu funcționează eficient la temperaturi mai mari de 200°C . Din acest motiv puterea electrică maximă care poate fi aplicată pe metru liniar la tubul de descărcare este de 530 W. Aceasta corespunde, la un randament de 15%, unei puteri de ieșire laser de max. 80 W. Dacă se furnizează o putere mai mare, amestecul gazos se supraîncălzește și puterea emisă nu crește. Singura modalitate de creștere a puterii este de a mări lungimea tubului.

Din informațiile avute se pare că laserul Photon Source de 1 Kw funcționând cu CO_2 este cel mai mare în acest moment dintre laserii grupei a I-a. El are o structură multitubulară (6 tuburi, fiecare de 2 m lungime așezate în Z) montată pe un bloc de granit.

Grupa II-a - cuprinde laserii la care se asigură o circulație forțată a amestecului activ, prin interiorul tubului, după direcția descărcării electrice. Circulația amestecului activ este asigurată cu ajutorul unor ventilatoare, acesta fiind apoi trecut prin niște schimbătoare de căldură care îi scad temperatura. Se pot atinge astfel puteri de pînă la 16 KW cu o putere maximă pe unitatea de lungime de 660 W/m.

Grupa a III-a - cuprinde laserii la care se asigură o recirculare a amestecului după o direcție perpendiculară pe axa descărcării sau pe axa optică. Acest mod de recirculare asigură o durată de "staționare" a amestecului în zona descărcării mult mai mică decît la laserele din grupa II-a. Se pot obține astfel puteri sporite pe unitatea de lungime, asigurîndu-se în același timp stabilizarea descărcării după alte mijloace decît la laserii din grupele I și II care aveau tubul din sticlă. Se folosește în acest caz un catod segmentat cu o rezistență de descărcare pe fiecare element.

O dezvoltare rapidă a cunoscut în ultimii ani aplicarea fasciculului laser în domeniul prelucrării dimensionale a materialelor. Optica de precizie și circuitele electronice comandă riguros poziția fasciculului și intensitatea acestuia pentru a realiza orificii de diametru mic, pentru a tăia piese de configurație complicată, a suda componente delicate sau a trata termic zone greu accesibile.

Deși oferă o serie de avantaje și calități, cu laserul nu se poate executa toate tipurile de prelucrare a materialelor. Aplicabilitatea laserilor are domenii limitate și anume, acolo unde avantajele lor tehnico-economice sînt superioare celorlalte procedee.

Așa cum spunea un furnizor de lasere: "laserele nu sînt făcute pentru a da găuri în munți, ci pentru a lucra cu piese complicate".

Si pentru că marea majoritate a întreprinderilor industriale au în programul de fabricație astfel de piese se poate afirma

Nr. crt.	Producătorul	Grupa	Puterea [KW]	Costul * [\$/w]	Situația vinzarilor
1	Photon Source	1	1	70	55
2	Sylvania 971	3	1,2	60	20
3	British Oxygen Co	2	2	60	5
4	UTROL	2	3	80	2
5	Sylvania 975	3	5	40	10
6	UTRL	2	6	50	1
7	UTRL	3	15	30	1
8	AERL	3	15	32	0/98

* Costul se referă la laserul de bază fără servituți și fără optică exterioară

Tab.2.1. Situația vânzării laserilor cu CO₂ de mare putere

Nr. crt.	Producătorul	Puterea		consumul de gaz [m ³ /h]	amestecul He/N ₂ /CO ₂	Cheltuieli [\$/h]			cost putere furnizată [\$/kWh]
		obținută [KW]	consumată [KVA]			energia electrică *	amestecul gazos **	total	
1	Photon Sources	1	18	0,47	8/23/1	0,72	0,9	1,62	1,65
2	Sylvania 971	1,2	40	0,06	22/5/1	1,60	0,18	1,78	1,48
3	Sylvania 975	5	60	0,39	22/5/1	2,40	1,10	3,50	0,70
4	UIRC	3	80	0,25	6/8/1	3,20	0,30	3,50	1,16
5	B.O.C	2	40	0,23	17/5/1	1,60	0,46	2,06	1,03
6	AVCO	15	250	6,30	3/2/1	10,00	9,10	19,10	1,27
7	AVCO ***	10	220	4,20	—	8,80	1,10	9,90	0,98

* considerind costul unui KW de 0,04 \$
 ** considerind heliu: 2,5 \$/m³, N₂ și CO₂: 0,36 \$/m³
 *** amestecul activ nu conține heliu

că orice firmă competitivă într-o industrie tehnologică avansată este obligată să exploateze rapid noile metode și echipamente.

La sfârșitul deceniului trecut o singură firmă americană (Western Electric) dispunea de peste 200 de lasere care efectuau 25 de operații diferite de fabricare, control și măsurare.

La ora actuală se poate aprecia că mai bine de jumătate din numărul instalațiilor laser fabricate pe plan mondial iau calea industriei fiind folosiți în mod direct în procesul de producție iar restul sînt destinați cercetărilor aplicative și dezvoltării.

La nivelul anului 1980 situația vânzărilor laserilor de mare putere cu CO_2 a principalilor producători era cea prezentată în tab.2.1; livrările fiind făcute în mare majoritate unor firme din S.U.A. și doar izolat în Europa și Japonia.

Exploatarea acestor instalații în regim industrial a permis stabilirea cheltuielilor aferente în timpul exploatarei ținînd cont de necesitatea reîmprospătării amestecului și neglijînd costul apei utilizate în vederea răcirii (tab.2.2).

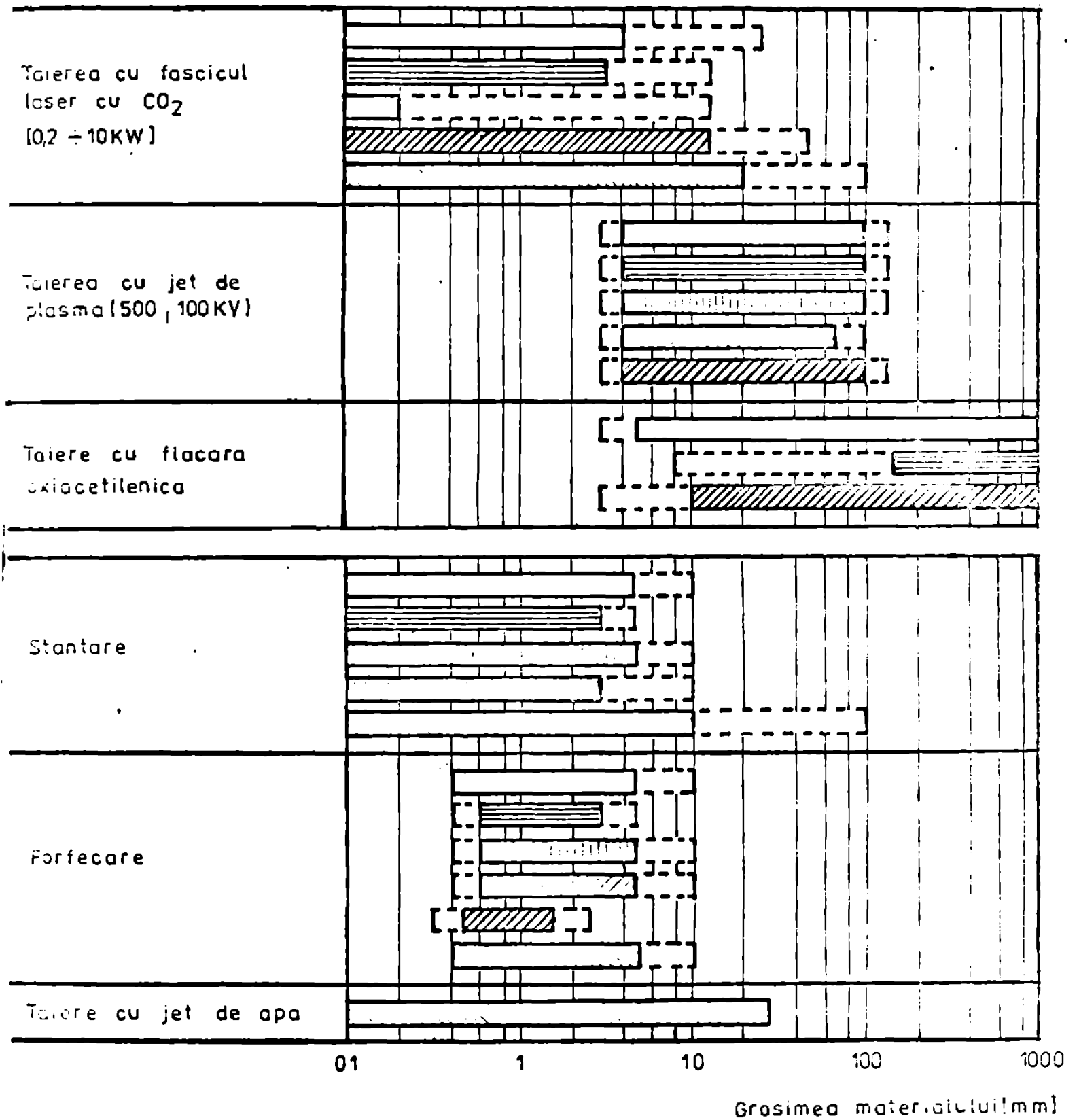
Deși costisitoare, noua tehnologie de prelucrare a materialelor, cea care utilizează fasciculul laser, găsește un larg câmp de aplicare în industrie.

Implementarea în producție a noilor instalații a apărut ca urmare a avantajelor deosebite și a calităților inegalabile pe care le oferă fasciculul laser.

Elementele tipice ale prelucrării cu ajutorul radiației laser sînt : înaltă densitate de putere, zonă îngustă de concentrație termică, viteză de prelucrare ridicată, deformare mecanică neglijabilă, precizie de prelucrare ridicată, transmiterea energiei fără contact, posibilitatea de lucru în atmosferă controlată (cu gaze oxidante, reducătoare, inerte sau vacuum), reproductibilitate ridicată, posibilitate ușoară de automatizare, eficiență economică etc.

Cu toate acestea domeniul de utilizare al radiației laser în prelucrarea materialelor este încă limitat. Este necesară o comparare prealabilă a avantajelor pe care le prezintă prelucrarea cu laser față de prelucrările prin procedee convenționale sau neconvenționale ce pot fi aplicate avînd același rezultat final sau unul apropiat.

Literatura oferă astfel de comparații atât pentru operațiile de tăiere cît și pentru cele de găurire.






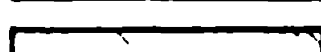
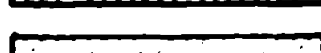


-  Otel nealiat sau slab aliat
-  Otel inalt aliat
-  Aluminiu si aliaje de aluminiu
-  Nemetale
-  Cupru
-  Titan
-  Zone de limita

Fig.2.1.

DOMENII DE UTILIZARE PENTRU PRINCIPALELE PROCEDEE DE DEBITARE

O astfel de comparație, privind operațiile de tăiere a materialelor metalice se prezintă în figura 2.1 /48,49/

În afara procedurilor de prelucrare cuprinse în fig.2.1. la debitarea materialelor metalice se utilizează cu succes fasciculul de electroni. Deși energia furnizată de acesta depășește uneori pe cea a laserului, fasciculul de electroni prezintă o serie de dezavantaje comparativ cu laserul. Astfel: prelucrarea cu F.E. se desfășoară de regulă în vid, element ce limitează dimensiunile pieselor ce pot fi prelucrate; durata de reglare este cu mult mai mare iar locul interacțiunii nu poate fi vizualizat; F.E. nu poate fi deviat în jurul obstacolelor etc.

Dacă procedurile termice prezentate (plasmă, flacără oxiacetilenică, fascicul de electroni), în anumite limite dimensionale, concurează cu laserul în domeniul prelucrării metalelor, laserul are în plus calitatea de a putea prelucra nemetale de structură foarte diversă.

Se poate menționa că un loc deosebit de aplicare al laserilor îl constituie atelierele de debitat table; fiind aproape de neînlocuit mai ales când se ivesc anumite condiții speciale. Astfel de condiții apar la decuparea pieselor de mărime mare, gabaritul depășind mărimea maximă a sculei ce poate fi montată de presa destinată decupării precum și forța maximă dezvoltată de aceasta; la prelucrarea pieselor de configurație complicată în serie mică sau chiar unicate când nu se justifică proiectarea unei scule de decupat sau când timpul pentru schimbarea sculei și reglarea utilajului este foarte mare; la prelucrarea unor piese care trebuiesc obținute imediat fără nici o modificare organizatorică etc. Cu laserul astfel de situații pot fi rezolvate rapid, mașinile de debitat cu laser fiind echipate cu mese în coordonate prevăzute cu posibilitate de programare și a căror urmărire se realizează cu ajutorul calculatorului electronic.

Tăierea cu laser permite realizarea unor decupări în unghi ascuțit, a unor praguri de lățime foarte mică la viteze de tăiere foarte mari. În ciuda vitezelor mari de tăiere muchia tăieturii prezintă o rugozitate mai mică de $20 \mu\text{m}$ /16/. Această rugozitate scăzută face ca la îndoierea tablelor tăiate cu laserul să nu apară fisuri pe marginea tablei așa cum apar la îndoierea tablelor ștanțate. /16/

Mărimi reglabile	Proprietățile materialului	Parametrii influențați
<p>Tipul laserului</p> <ul style="list-style-type: none"> - cu CO₂ - sticlă cu Nd <p>Calitatea radiației</p> <p>Caracteristicile de funcționare</p> <ul style="list-style-type: none"> - continuu - impulsional electric energia impulsului durata impulsului - modulat optic puterea impulsului energia impulsului <p>Parametrii de focalizare</p> <ul style="list-style-type: none"> - distanța focală - distanța pînă la piesă - distribuția radiației 	<p>Proprietățile optice</p> <ul style="list-style-type: none"> - calitatea suprafeței - absorbția - reflexia... <p>Proprietățile termice</p> <ul style="list-style-type: none"> - temp. de vaporizare - temp. de topire - căldura de vaporizare - coeficient de dilatare - conductibilitate <p>Proprietățile mecanice</p> <ul style="list-style-type: none"> - rezistență - elasticitatea - duritatea <p>Proprietăți metalurgice</p> <p>Proprietăți chimice</p>	<p>Felul prelucrării</p> <ul style="list-style-type: none"> - găurire - tăiere <p>Forma prelucrării (axial)</p> <ul style="list-style-type: none"> - cilindric - conic... <p>Geometria prelucrării (radial)</p> <ul style="list-style-type: none"> - circular - oarecare <p>Calitatea prelucrării</p> <ul style="list-style-type: none"> - forma craterului - starea pereților - fisuri, rizuri... <p>Dimensiunile prelucrării</p> <ul style="list-style-type: none"> - diametru - adâncime, lățime...

Tab.2.3. Mărimile esențiale la prelucrarea cu laser a materialelor.

Au fost realizate încercări de tăiere a tablelor așezate în poziție verticală /20/. Nici în aceste cazuri nu s-au constatat influențe asupra calității tăieturii, picăturile de metal topit fiind suflate de jetul de gaz utilizat.

Zona influențată termic la debitarea cu laserul este mai mică decât cea obținută la alte procedee de debitare termică. /16, 19,20,48/

De o importanță deosebită la prelucrarea cu laser a materialelor este cunoașterea parametrilor care influențează procesul de prelucrare. În tab.2.3 /104/ se face o trecere în revistă a principalelor parametri ce trebuie luați în considerare la prelucrarea cu laser.

Multitudinea parametrilor care intervin la prelucrare și faptul că mărimile reglabile nu pot fi variate după dorință și nici independent una de alta, că proprietățile materialelor se pot deosebi mult unele de altele, toate acestea reprezintă problematica de studiu a prelucrării materialelor cu ajutorul laserului.

Stăpânirea procesului de prelucrare cu ajutorul laserului presupune :

a) cunoașterea influenței caracteristicilor laserului asupra piesei,

b) posibilitatea determinării caracteristicilor laserului pentru obținerea unei anumite influențe asupra unui material dat,

c) cunoașterea limitelor aparatului și procesului. În procesul de tăiere cu laser a materialelor s-a dovedit că un rol important îl are natura și presiunea gazului ajutător. /19,20,48,106,108/ Felul gazului ajutător se alege în funcție de natura materialului supus prelucrării /3,19,48,84,98/ La tăierea materialelor metalice se utilizează cu preponderență oxigenul. Reacția fier-oxigen care are loc decurge în acest caz mai intensiv la oțelul moale,nealiat, în comparație cu oțelul inoxidabil /20/. Intrucât coeficientul de conductibilitate termică la oțelurile moi de construcție este de aproximativ trei ori mai mare decât la oțelurile austenitice, procesul de oxidare se abate mai puțin de la direcția de tăiere. Dacă viteza de tăiere rămâne sub o anumită valoare, în funcție de material, procesul se întinde mult peste domeniul cuprins de fasciculul laser; rostul de tăiere devine lat și neuniform.

La începerea procesului de tăiere se recomandă viteze mai mici de prelucrare, viteze care pot fi crescute după un anumit timp de la amorsarea procesului.

La încercările de tăiere cu duze de diferiți diametrii (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; și 3 mm) s-a constatat că diametrele mici ale duzelor determină rosturi de tăiere mai înguste, tăieturi mai uniforme și zone afectate termic de lățime mai redusă.

Pentru prelucrarea cu laserul a materialelor nemetalice se folosește cu succes aerul comprimat.

Procesul de prelucrare al nemetalelor cu ajutorul laserului este uneori influențat de lungimea de undă a radiației incidente. Astfel, la prelucrarea sticlei se impune alegerea unor radiații laser cu $\lambda \geq 1,06 \mu\text{m}$, radiația cu lungimea de undă sub această valoare este foarte slab absorbită de sticlă /98/. De asemenea, la aceste materiale zona de vaporizare este de cca 8 ori mai mare, apărînd astfel și o zonă topită mult mai pronunțată decît la materialele metalice.

La prelucrarea stofelor sintetice /20/ se produce o ușoară topire a diferitelor straturi de-a lungul tăieturii, fenomen ce împiedică destrămarea ulterioară a țesăturii.

La prelucrarea simultană a mai multor straturi de materiale nemetalice (stofe, piele, sticlă, textolit, etc) se recomandă o presare prealabilă a acestora sau introducerea unor foițe subțiri de hîrtie pentru ca gazele de ardere să nu pătrundă între straturi și să coloreze materialul de-a lungul tăieturii. La tăierea materialelor lemnoase s-a observat că gradul de umiditate ridicat al acestora are o influență favorabilă asupra calității și productivității procesului de tăiere /84/. În lucrarea /84/ se stabilesc relații de dependență empirice între viteza de tăiere și grosimea materialului la tăierea materialelor lemnoase cu un laser de 5KW. Unele rezultate experimentale obținute la tăierea materialelor în diverse încercări /3,15,18,19,20,41,55,84,98,106/ sînt prezentate în Tab. 2.4 și 2.5 pentru materiale metalice respectiv nemetalice.

Domeniul de utilizare al laserului îl reprezintă, actualmente, în primul rînd acele prelucrări care sînt foarte greu sau chiar imposibil de realizat cu tehnologiile convenționale. Date fiind dimensiunile mici ce se pot realiza prin prelucrare, utilizarea laserului se face cu deosebit succes în micromecanică, industria de ceasornicărie, și în electronică. Industria de mecanică fină utilizează astăzi pe scară largă laserele pentru prelucrarea lagărelor diverselor aparate (ceasornice, aparate electrice de măsură etc). Procedeeul asigură o înaltă productivitate și o bună calitate a găurilor.

Materialul	Grosimea [mm]	Puterea laserului [kw]	Parametrii tăierii		Observații
			viteza [m/min]	lățimea [mm]	
ST 37-2 (OL 37-2n)	1,00	0,20	3,00	0,10	cu oxigen
	3,00	0,20	0,60	0,20	
	3,00	0,30	0,90	0,20	
	4,00	0,50	1,00	0,25	
	5,00	0,50	0,70	0,30	
	6,00	0,50	0,40	0,35	
	2,30	0,85	1,80	-	
otel crom nichel 18/8	1,00	0,20	1,50	0,10	
	25,00	15,00	0,50	-	
AISI 304 ($\leq 0,08\%C$, 18-20%Cr, 8-12%Ni, $\leq 2\%Mn$)	0,70	0,40	2,70	0,15	
	1,00	0,40	2,10	0,12	
	3,00	0,40	0,30	0,40	
	1,50	0,50	1,40	0,13	
80 Cr V2 (51 VCr 11A)	2,70	0,50	1,20	0,20	
	3,50	0,50	1,10	0,25	
X5 Cr Ni 189	1,50	0,50	4,50	0,20	
X2Cr Ni 189 (2NiCr 185)	1,50	0,50	3,60	0,20	
X10 Cr Ni Ti 189	2,00	0,50	1,50	0,30	
aliaje de titan	0,80	0,40	1,90	0,20	cu aer comprimat
	0,50	0,65	33,00	-	
	12,00	11,00	2,50	-	
aluminiu	0,70	0,50	1,50	0,20	cu oxigen
	12,00	5,00	0,75	0,40	
	12,00	10,00	1,03	0,42	
cupru	0,60	0,50	0,50	0,20	
aliaj refractar	12,00	11,00	1,25	0,30	
	32,00	10,00	0,40	0,35	

Tab. 24. UNELE REZULTATE EXPERIMENTALE LA TAIEREA CU LASER CU CO₂ A MATERIALELOR METALICE

Materialul	Grosimea [mm]	Puterea laserului [kw]	Parametrii tăierii		Observații	
			viteza [m/min]	lățimea [mm]		
Placaj	4,00	0,37	8,75	0,22	cu aer comprimat	
	10,00	0,30	2,00	0,21		
	15,00	0,50	0,90	0,50		
	18,00	0,50	0,70	0,60		
	6,25	2,00	22,50	0,45		
	18,75	2,00	4,80	0,60		
Lemn de brad verde (umiditate 37%)	25,40	2,00	2,80	0,71		
	25,40	5,00	10,00	0,60		
	38,00	4,00	2,80	0,75		
	38,00	5,00	4,38	0,79		
Plăci aglomerate	12,90	1,00	3,00	0,71		
	12,90	2,00	5,64	0,63		
	12,90	3,00	8,83	0,63		
	12,90	4,00	11,25	0,60		
Plexiglas	6,00	0,30	1,90	0,19	cu argon	
	9,00	0,40	1,30	0,40		
	3,00	0,30	0,15	0,54		
Stofe în straturi	lână	4,00	0,40	8,30	-	cu N ₂
		9,00	0,40	2,30	-	
	bumbac	15,00	0,00	0,90	0,50	
		15,00	0,50	2,00	0,50	
	sintetică	9,00	0,40	1,80	-	
Sticlă din cuarț	1,90	0,20	0,60	0,20	cu O ₂	
	2,00	0,50	1,20	0,20		
Azbociment	5,00	0,50	1,20	0,10	cu N ₂	
Covor PVC.	3,00	1,00	6,60	0,30		
	7,00	0,20	1,20	0,50		
	16,00	0,50	1,10	1,00		
Hirtie	3,00	0,30	5,20	0,13		
Material plastic cu fibre de sticlă	3,30	0,30	0,60	0,30		
	5,00	0,40	0,80	0,35		

Tab. 2.5. REZULTATE EXPERIMENTALE LA TAIEREA CU LASER CO₂ A UNOR MATERIALE NEMETALICE

Limitele inferioare ce pot fi atinse prin găurirea cu laserul depind pe de o parte de lungimea de undă a radiației, și pe de altă parte de adâncimea găurii ce trebuie realizate.

Au fost realizate orificii cu diametrul sub 10 μm , la un raport între diametrul găurii și adâncimea acesteia ce variază de la 1:10 la 1:30 /104/ și chiar pînă la 1:50 /103/

Dimensiunea maximă a găurii este limitată de energia impulsului laser și de numărul impulsurilor ce se aplică în condiții economice.

Pentru operația de găurire se recomandă utilizarea unor instalații laser ce asigură densități mari de energie și durată a impulsului cît mai scăzută, aceasta pentru a fi preponderentă faza de vaporizare în procesul de prelevare /46/

O densitate de putere prea mică determină pierderi prin conducție termică foarte mari, prelucrarea devenind greoaie, uneori imposibilă; iar densitățile de putere prea mari pot determina formarea unei plasme care blochează accesul radiației la piasă și prelucrarea se face la fel de dificil ca și în cazul precedent. Uneori, pentru realizarea unor orificii în materiale fragile și foarte dure se recomandă totuși energii mici aplicîndu-se un număr foarte mare de impulsuri.

Astfel, la găurirea filierelor de diamant se utilizează cu succes un laser Nd-YAG cu energia impulsului de 1 J; cu o frecvență a impulsurilor de 5 - 10 impulsuri/secundă și o durată a impulsului de 200 μs . (tab.2.6) /51/.

Diametrul orificiului [mm]	Grosimea diamantului [mm]	Numărul de impulsuri	Durata prelucrării [min]
0,10	1,0	600	2,0
0,40	1,0	1900	6,3
0,95	1,5	3500	11,7

Tab. 2.6. Prelucrarea cu laser Nd YAG a diamantelor (Energia impulsului 1J, durata impulsului 200 μs).

490400
354 G

Proprietățile materialului în zona învecinată orificiului nu se modifică la găurirea cu laser, comparativ cu alte tehnici de găurire. Astfel, la efectuarea orificiilor în paletele turbinelor de avion prin procedee electrochimice se constată un procentaj foarte mare de orificii fisurate după un anumit număr de cicluri termice (tab.2.7) /56/

Procedeul de găurire	Procentajul de fisuri după		
	1000 cicluri	3 500 cicluri	10000 cicluri
electrochimic	0	45	97
cu laser	0	31	77
cu laser și finisare abrazivă	0	1	13

Tab. 2.7. Procentajul de fisurare a găurilor de la paletele turbinelor de avion după un anumit număr de cicluri termice.

Deși găurirea cu laser este foarte productivă, forma geometrică a orificiilor obținute prin acest procedeu lasă încă mult de dorit. S-au efectuat o serie de încercări pentru îmbunătățirea acestei forme : suflare de aer comprimat /81/, vibrație ultrasonică a probei /65,66/, diafragmarea fasciculului /81,104/ etc.

La vibrația ultrasonică a probei în timpul procesului de găurire cu laser s-a constatat o dependență a parametrilor procesului de găurire de amplitudinea vibrațiilor /66/. Astfel, amplitudinea vibrațiilor ultrasonice influențează în mod favorabil depunerile de material topit pe pereții orificiului perforat. La frecvențe de 40 μm depunerile pe pereți sînt minime, o influență deosebită constatîndu-se la prelucrarea aluminiului și a oțelurilor inoxidabile. Cu creșterea amplitudinii vibrațiilor se constată o creștere a adîncimii găurii la aceeași energie a impulsului în mod deosebit la aluminiu și neesențial la oțelurile inoxidabile. Același efect se constată referitor la diametrul orificiului.

Utilizarea în procesul de găurire a unui jet coaxial de aer comprimat /81/ determină o mai bună reproductibilitate a dimensiunilor găurii, o formă mai apropiată de cea circulară și o cantitate mult mai redusă de material resolidificat pe marginea orificiului perforat.

Influențe similare produce asupra operațiilor de găurire diafragmarea fasciculului laser înaintea intrării acestuia în sistemul de focalizare.

Rezultatele prezentate în diverse lucrări sînt însă contradictorii, ceea ce arată că aceste influențe depind în mare măsură de calitățile instalației laser folosite, de proprietățile materialului supus prelucrării etc.

Cu instalații declarate identice din punct de vedere al caracteristicilor fasciculului, dar provenite de la constructori diferiți, rezultatele obținute se deosebesc uneori foarte mult.

Aceste neconcordanțe justifică preocupările din prezenta lucrare de a stabili influența parametrilor radiației laser asupra regimului de prelucrare și a preciziei de prelucrare. Incercările prezentate sînt efectuate pe materiale autohtone și cu ajutorul instalațiilor de producție românească.

3. INTERACȚIUNEA RADIĂȚIEI LASER FOCALIZATE CU MATERIALUL SUPUS PRELUCRĂRII

3.1. Considerații generale

Fenomenele fizice care au loc la interacțiunea radiației laser cu materia se studiază de peste 20 ani. În ultimii ani se dă o mare atenție interacțiunii cu materia solidă a radiației laser focalizate avînd o densitate mare de putere.

Aceste cercetări au devenit posibile datorită faptului că s-au oferit cercetătorilor generatoarele și amplificatoarele cuantice necesare pentru aceste studii. Prin realizarea unei mari diversități de laseri cu emisie continuă sau/și în impulsuri, cu densități de putere ce depășesc valori de $10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$ (pentru laseri destinați utilizărilor tehnologice) s-au putut studia toate fazele interacțiunii radiației laser cu materia. Cu toate acestea, complexitatea fenomenelor ce apar în procesul de interacțiune precum și nivelul actual al tehnicilor de investigare, nu au permis elucidarea și explicitarea completă a fenomenelor ce se produc.

Absorbția radiației laser de către materialul constituit drept țintă poate să conducă la diferite efecte, funcție de aspectul și proprietățile materialului asupra căruia se acționează, de densitatea de putere a radiației absorbite, de durata de acțiune a fasciculului laser, de forma distribuției energiei în fascicul etc.

Folosirea radiației laser focalizate în procesul de prelucrare al materialelor se bazează îndeosebi pe efectul termic ce apare în urma interacțiunii. Densitățile mari de putere ce se pot obține (fig.3.1) prin focalizarea radiației laser, permit topirea și vaporizarea materialului supus prelucrării. Față de celelalte procedee neconvenționale de prelucrare a materialelor (plasmă și fascicul de electroni) la care este predominantă topirea materialului, respectiv topirea și vaporizarea, radiația laser

focalizată permite densități de putere la care se obține o vaporizare preponderentă. Topirea și vaporizarea intensivă a materialului supus prelucrării conduce la o prelevare de material ce conferă procedeului o productivitate ridicată, comparabilă sau chiar superioară unor alte tehnologii de prelucrare.

În momentul de față literatura de specialitate oferă soluții teoretice pentru efectele produse de radiația laser asupra materialelor atât pentru surse statice cât și pentru surse mișcătoare, asupra unei mari varietate de geometrii. În majoritatea acestor soluții, conducția termică este considerată ca principal mecanism al transferului energetic de la radiația laser incidentă la material. Condițiile în care aceste soluții pot fi aplicate în practică depind în mare măsură de respectarea întocmai a situațiilor impuse de autor și în egală măsură de densitatea de putere incidentă.

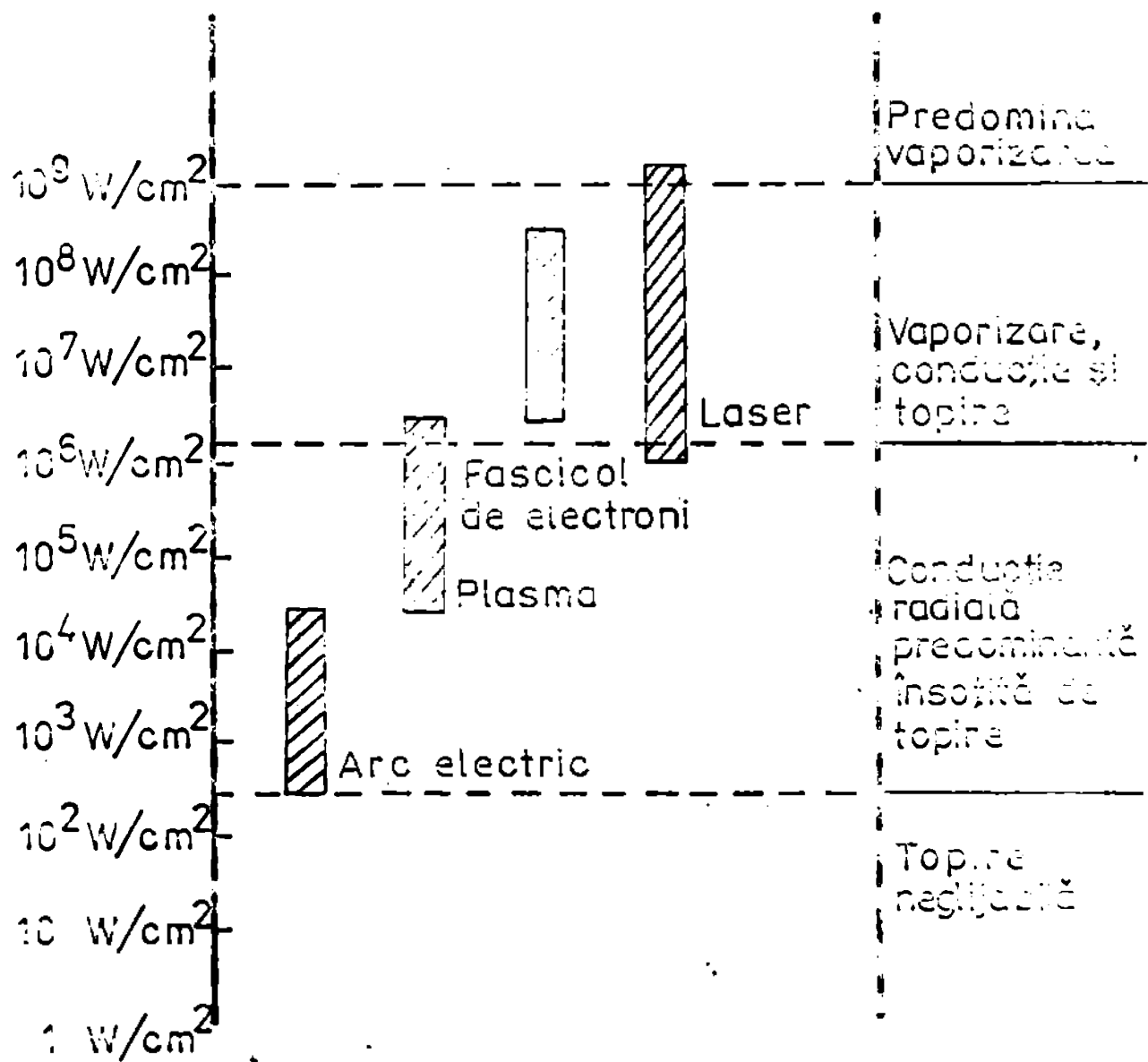


Fig.3.1 Densitatea de putere pentru diferite procedee de prelevare de material

Procesul de interacțiune al radiației laser focalizate cu materia poate fi împărțit (teoretic) în următoarele faze :

- absorbția radiației laser de către materie,
- transmiterea căldurii către materialul de bază,
- încălzirea și îndepărtarea fazei gazoase și a fazei lichide.

La incidența unei radiații laser cu o suprafață metalică, o mare parte din energie este reflectată, energie ce pentru un laser cu mediu activ sticlă dopată cu Nd (cu lungime de undă $\lambda_0 = 1,06 \mu\text{m}$) poate ajunge la 90%. Partea din energia nereflectată este absorbită de stratul superficial pe o adâncime ce poate fi determinată cu relația :

$$l = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\pi \cdot c_0 \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (3.1)$$

în care; $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s - viteza luminii,
 μ - permeabilitatea electrică,
 σ - conductivitatea electrică.

Pentru cupru, înlocuind valorile respective, se obține grosimea stratului absorbant a unei radiații provenite de la un laser cu $\lambda_0 = 1,06 \mu\text{m}$. la valoarea $l = 3,7 \text{ nm}$. Valoarea deosebit de redusă a stratului absorbant ne permite să afirmăm că absorbția se face la suprafața materialului. Energia absorbită este transmisă apoi prin conducție materialului de bază la o distanță Z în timpul τ :

$$z = (a \cdot \tau)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

în care; a - difuzivitatea termică a materialului dată de relația:

$$a = \frac{\lambda}{\rho (c + \lambda_t / T_t)} \quad (3.3)$$

unde; λ - conductivitatea termică (Kcal/m.h.°),
 ρ - densitatea materialului (kg/m^3),
 c - căldura specifică ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$),
 λ_t - căldura de topire a materialului (Kcal/kg),
 T_t - temperatura de topire ($^\circ\text{C}$).

Deși nu dă indicații asupra cantității de căldură, relația (3.2) ne permite totuși să apreciem cât de departe de sursa de căldură se va simți efectul termic al acesteia într-un timp dat.

Dacă se consideră un impuls termic ce pleacă din origine la timpul $\tau = 0$, se obține prin diferențiere, viteza undei termice în orice punct :

$$\frac{dz}{dz} = v_z = \frac{a}{2\sqrt{a \cdot z}} = \frac{a}{2z} \quad (3.4)$$

Deoarece viteza este proporțională cu Z^{-1} , urmează că, pentru o sursă uniform distribuită, timpul necesar pentru ca efectul ei să se simtă în orice punct din afara sursei depinde de distanța acestui punct față de marginea sursei. Înlocuind în relația 3.4 mărimile de stare ale cuprului [$\lambda = 340 \text{ Kcal/m.h } ^\circ\text{C}$; $c = 0,093 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$; $\lambda_t = 50 \text{ Kcal/kg}$; $T_t = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$] și considerînd un punct aflat la distanța de $1 \mu\text{m}$ față de marginea sursei de căldură, se obține viteza cu care este condusă căldura spre interiorul ariei asupra căreia acționează sursa termică ;

$$v \cong 49 \text{ m/s}$$

Această valoare a vitezei este o caracteristică de material și nu depinde de caracterul sau puterea sursei termice.

Dacă viteza de conducție a undei termice nu depinde de densitatea de putere a radiației, în schimb vaporizarea depinde în mod direct de aceasta. Pentru o sursă de intensitate $I \text{ [W/cm}^2\text{]}$ viteza de deplasare a frontului de vaporizare, în absența pierderilor prin conducție este :

$$v' = \frac{I_0}{\rho \cdot c} \quad (3.5)$$

Valorile lui v' sînt prezentate în tab.3.1 /44/ pentru diferite valori ale intensității I .

Este evident că această relație este valabilă numai pentru cazurile în care vaporizarea este atît de rapidă încît nu au loc pierderi prin conducție și nu apare faza lichidă ($v' \gg v$).

În baza datelor prezentate în tab.3.1 se poate trage concluzia că la densități de putere $I = 10^9 \text{ w/cm}^2$, $v' \gg v$ radiația laser realizează în material un orificiu cu diametru aproximativ egal cu diametrul focalizat, și doar o mică parte din căldură va fi absorbită de pereții găurii, vaporizarea fiind predominantă. La densități de putere $I < 10^9 \text{ w/cm}^2$ trebuie considerată și conducția termică, valoarea lui v' calculată este mai mică, ea depinzînd și de mărimea spotului focalizat nu doar de densitatea de putere. Trebuie considerată de asemenea reflexia radiației laser de către suprafața probei, reflexie ce determină o reducere considerabilă a densității de putere luată în calcul.

Densitatea de putere I [W/cm^2]	Viteza undei termice v [m/s]	Viteza frontului de vaporizare v_f [m/s]
$3 \cdot 10^{10}$	49	6000
$3 \cdot 10^9$	49	600
$3 \cdot 10^8$	49	60
$3 \cdot 10^7$	49	6
$3 \cdot 10^6$	49	0,6
$3 \cdot 10^5$	49	0,06
$3 \cdot 10^4$	49	0,006

10.01. VITEZA UNDEI TERMICE SI A FRONTULUI DE VAPORIZARE PENTRU
DIFERITE DENSITATI DE PUTERE (MATERIAL: CUPRU)

Se vede deci că problema interacțiunii radiației laser cu
materia este mult mai complexă decât cazul simplificat prezentat,
fazele procesului de interacțiune nu pot fi separate în timpul
procesului de prelucrare, ele influențându-se reciproc și generând
o serie de fenomene auxiliare a căror reprezentare schematică se
poate vedea în fig.3.2 /72/

Cu ajutorul radiației laser materia este încălzită, se dilată
și vaporizată. Procesul de îndepărtare prin vaporizare este influențat
de transmisia radială a căldurii, de expansiunea gazei
ionizate și de comportarea la absorbție a norului de abur. O în-
țelegere completă a interacțiunii dintre radiația laser și materia
solidă, ținându-se cont de proprietățile radiației laser și ale
materiei, nu s-a făcut încă.

Un fascicul laser ce cade pe suprafața unui material este
absorbit într-o proporție mai mare sau mai mică, gradul de absorp-
ție depinzând de o serie de factori. O serie de cercetători susțin
că absorbția radiației laser de către materie crește odată cu
creșterea unei anumite intensități, denumită intensitate de prag. În
cazul materialelor solide valoarea intensității de prag este

constanta $I_p \approx 10^8 \text{ W/cm}^2$; I_p este independentă de proprietățile laserului și ale materiei. /8,24,52,89/. La depășirea intensității de prag gradul de absorbție A crește la valori $A > 0,9$, gradul de reflexie R și gradul de transmisie T al materiei solide la valori scade sub 0,1.

Coefficientul de absorbție al materiei solide ajunge la valori $\alpha \in (10^3 \div 10^4) \text{ cm}^{-1}$ după un timp $\tau \in (0,2; 0,5) \mu\text{s}$ iar lungimea de absorbție $l \in (10^{-4}, 10^{-3}) \text{ cm}$ /52,90/; produsul dintre coeficientul de absorbție și lungimea absorbantă rămânând constant ($\alpha \cdot l \approx 1$.)

Prin absorbția radiației laser materia solidă este încălzită, topită și apoi vaporizată. Unii autori /78,90/ discută faza de vaporizare ca o problemă de transmitere a căldurii unidimensională, faza lichidă fiind neglijată. Datorită îndepărtării materiei în faza lichidă viteza de îndepărtare este mai mare decât cea obținută din modelul vaporizării /24/. Se ajunge la concluzia că faza lichidă este accelerată în direcție radială, datorită presiunii exercitate de vapori pe suprafața materialului. Alți autori /80/ extind modelul lui Ready ținând cont și de faza lichidă, care, prin absorbția radiației laser este încălzită la temperatura de vaporizare. Dacă în această baie de topitură există impurități, topitura începe să fiarbă. După alți autori /91,114/ raza zonei topite este mai mare decât raza fasciculului laser incident, fenomen ce se pune pe seama transmiterii radiale a căldurii.

Prin absorbția radiației laser materialul este încălzit și ionizat. Energia termică din plasma ce se formează este transformată integral, după Ready, în energie necesară deplasării. Plasma este expandată cu o viteză de pînă la 10^7 cm/s , presiunea datorită reculului atîngînd valori de pînă la 10^5 atm .

Viteza și presiunea ce se obține depînd de densitatea de putere absorbită de plasmă. La depășirea unei densități de putere de valoare aproximativ egală cu $5 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$, plasma produsă ecranază materialul, interacțiunea laser . materie trece într-o interacțiune plasmă materie /99/.

Gradul de ecranare este dependent de mărimea coeficientului de absorbție al plasmăi. La valori ale coeficientului α cuprinse între 10^2 cm^{-1} și 10^3 cm^{-1} , ecranarea este completă dacă plasma se extinde pe aproximativ $100 \mu\text{m}$.

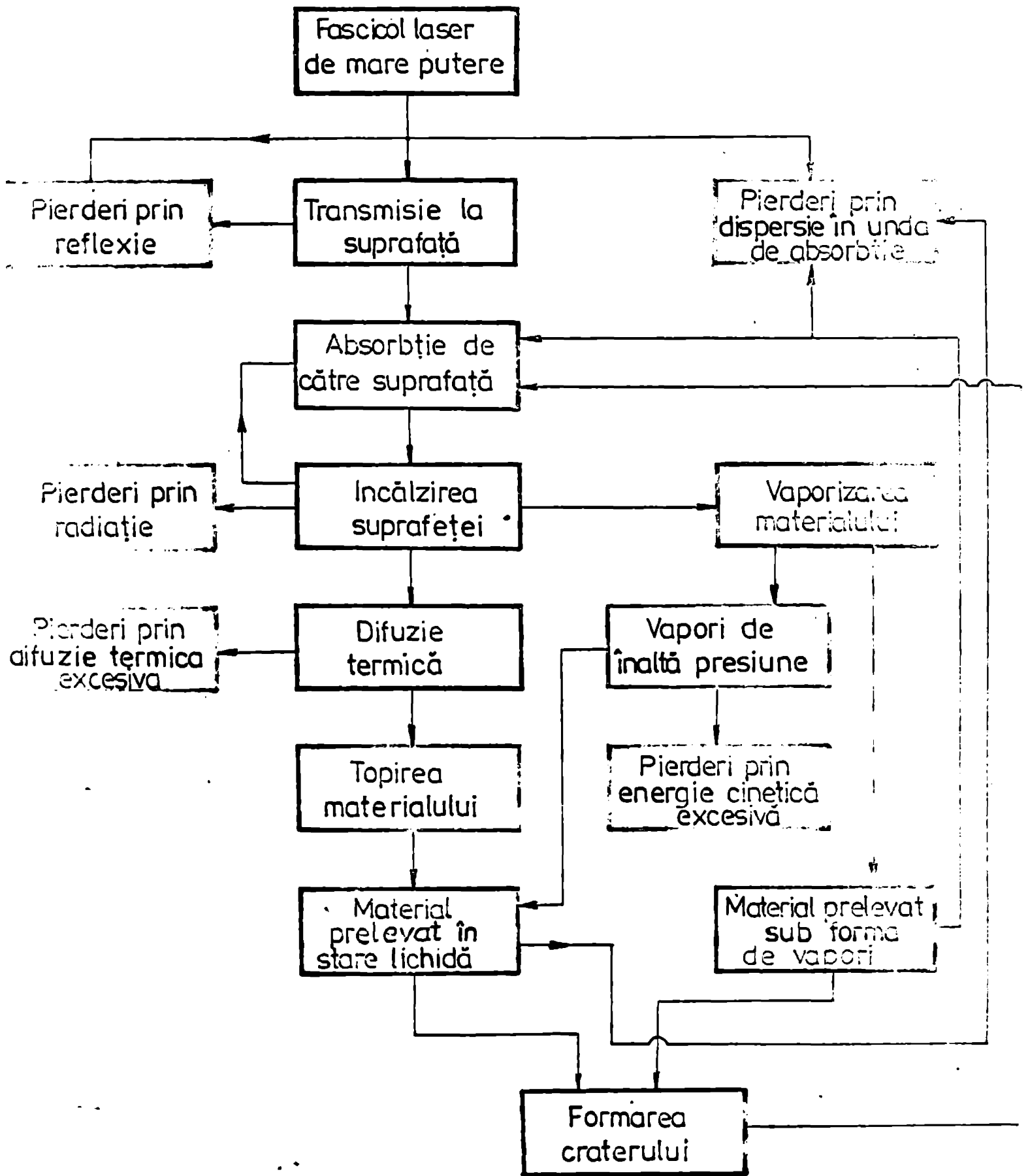


Fig. 3.2. SCHEMA BLOC A PRINCIPALELOR FENOMENE CE APAR LA INTERACȚIUNEA RADIATIEI LASER DE MARE PUTERE CU O SUPRAFATA METALICA.

La interacțiunea radiației laser cu materia trebuie deci să ținem cont de transmiterea radială a căldurii, de îndepărtarea fazei lichide precum și de ecranarea pe care o produce norul de abur ce apare ca urmare a vaporizării intensive a materialului.

3.2. Faza de absorbție a radiației laser de către materie

Radiația laser poate fi reprezentată ca un câmp electromagnetic clasic.

Intensitatea unei unde electromagnetice plane transversale;

$$E(z, \mathcal{Z}) = E_0 \cdot e^{i(\hat{k} \cdot z - \omega \cdot \mathcal{Z})} \quad (3.6)$$

este dată de relația /83/:

$$I = E_0^2 \cdot e^{-2k_i z} \quad (3.7)$$

în care;

E - câmpul electric,

E_0 - amplitudinea,

$\hat{k} = k_r + i \cdot k_i$ - numărul complex al undei,

z - direcția de propagare a undei,

$\omega = 2 \pi f$ - pulsația undelor electromagnetice,

f - frecvența,

\mathcal{Z} - timpul,

k_r, k_i - coeficientul părții reale respectiv imaginare a numărului complex al undei.

Înlocuind valoarea lui k , relația (3.6) se poate scrie;

$$E(z, \mathcal{Z}) = E_0 \cdot e^{-z k_i} \cdot e^{i(k_r \cdot z - \omega \cdot \mathcal{Z})} \quad (3.8)$$

Gradul de absorbție al materialelor solide ($A_s = 1 - R$) și cel al materiei sub formă de vapori ($A_v = 1 - T$) pot fi descrise, în cazul unei incidențe perpendiculare a radiației laser, cu ajutorul relației;

$$A_{s,v} = 1 - e^{-\alpha l} \quad (3.9)$$

în care; α - coeficientul de absorbție,

l - lungimea absorbantă - este valoarea lui z în care are loc absorbția radiației laser.

Dacă considerăm indicele de refracție complex

$$\hat{n} = n_r + i \cdot n_i \quad (3.10)$$

determinat ca și numărul complex al undei k din relațiile lui Maxwell; coeficientul de absorbție se poate determina cu relația;

$$\alpha = \frac{2\omega}{c_0} \cdot n_i = 2k_0 \cdot n_i = 2k_i \quad (3.11)$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0}; \quad c_0 - \text{viteza luminii în vid.}$$

Se poate considera /7/ că faza inițială a absorbției constă în acțiunea radiației laser asupra electronilor liberi sau legați, electroni ce prin acțiunea lor asupra rețelei cristaline sau a altor electroni condiționează creșterea temperaturii materialului. Timpul de transmitere a energiei electronilor care se ciocnesc cu fotonii radiației laser, electronilor rețelei cristaline este de 10^{-11} s. /78/. Dacă ν_c este frecvența de ciocnire a unui electron, pulsația radiației laser este mult mai mare decât această frecvență atât pentru materialele solide cât și pentru

$$\omega \gg \nu_c \quad (3.12)$$

cele gazoase.

Diferența în comportarea optică a celor două faze, solidă și gazoasă este determinată de densitatea de electroni diferită a acestora (n_e).

Nu se poate face o diferențiere între faza gazoasă și cea condensată ci doar între materii cu densitate de electroni diferite.

Dacă considerăm pulsația plasmei ω_p , valoarea coeficientului de absorbție se poate calcula cu relația /83/;

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{2}}{c_0} \cdot \left\{ \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu_c}{\omega}\right)^2} \right]^2 + \left[\frac{\nu_c}{\omega} \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu_c}{\omega}\right)^2} \right]^2} - \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu_c}{\omega}\right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Pentru materii cu densități de electroni reduse (ca de exemplu; vapori) pulsația plasmei :

$$\omega_p = e \sqrt{\frac{n_e}{\epsilon_0 \cdot m_e}} \quad (3.14)$$

este mai mică decât pulsația laserului ($\omega_p < \omega$). Coeficientul de absorbție, neglijînd termenii de valoare foarte mică din relația (3.13), și considerînd valabilă relația (3.12), se poate calcula cu relația simplificată :

$$\alpha_v \approx \frac{\gamma_c \cdot \omega_p^2}{c_0 \cdot \omega^2} = \frac{\gamma_c}{c_0 \cdot \omega^2} = \frac{e^2 \cdot n_e}{\epsilon_0 \cdot m_e} \quad (3.15)$$

În relațiile (3.14) și (3.15) s-au notat :

m_e - masa electronului,

e - sarcina electronului,

ϵ_0 - constanta dielectrică a vidului.

Pentru materiale cu densități de electroni ridicate (metale), pulsația plasmei este mai mare decât pulsația laserului ($\omega_p > \omega$) și coeficientul de absorbție capătă forma simplificată:

$$\alpha \approx \frac{2e}{c_0} \cdot \sqrt{\frac{n_e}{\epsilon_0 \cdot m_e}} \quad (3.16)$$

Dacă considerăm că focalizarea radiației laser se realizează pe suprafața materialului într-un spot de diametru d_p , volumul în care este preluată și transformată în căldură energia laserului are o formă cilindrică dată de relația

$$V = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \cdot l \quad (3.17)$$

Diametrul spotului focalizat depinde de o serie de factori dar mai ales de calitățile semnalului laser și ale opticii de focalizare.

La depășirea unei anumite densități de energie Q_v în volumul de interacțiune se produce o vaporizare a materiei condensate. Energia necesară aducerii în stare de vapori a unității de volum este dată de relația /78,82/ :

$$Q_v = \rho \left[c(T_v - T_o) + \lambda_t + \lambda_v \right] \quad (3.18)$$

în care; ρ - densitatea materiei condensate,
 c - căldura specifică,
 T_v - temperatura de vaporizare,
 T_o - temperatura mediului ambiant,
 λ_t - căldura de topire,
 λ_v - căldura de vaporizare.

Pentru materialele metalice această densitate de energie este cuprinsă între 10^4 și 10^5 W.s/cm². La depășirea densității de energie dată de relația (3.18) în volumul de interacțiune V materia se găsește în stare gazoasă. Cum mărimea absorbției depinde de densitatea electronilor, rezultă că apare o comportare optică a materiei ce nu mai depinde de proprietățile specifice ale acesteia. Transferul de energie se realizează în continuare de la radiația laser la materialul de bază prin intermediul norului de vapori. Trecerea în stare de vapori a materiei condensate are drept urmare o reducere a densității electronilor. Coeficientul de absorbție se modifică; valoarea sa și deci implicit absorbția depind de intensitatea radiației laser.

Densitatea electronilor crește, pentru materia condensată odată cu creșterea intensității. Odată cu depășirea intensității de prag I_p , electronii primari liberi (n_o) aflați în volumul de interacțiune V , preiau din câmpul laser atîta energie încît să aibă loc printr-o ionizare prin șoc, o avalanșă de electroni. Densitatea de electroni crește astfel pînă la valoarea sa critică dată de relația /3.1/:

$$n_e \cong \frac{\epsilon_o}{e^2} \cdot \frac{4KT_e}{d_f^2} \quad (3.19)$$

în care; T_e - temperatura electronilor,
 K - constanta lui Boltzmann.

Schimbarea temporară a densității de electroni este dependentă de rata de producere $\dot{\nu}_i^o$ și rata pierderilor $\dot{\nu}_l$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (\dot{\nu}_i^o - \dot{\nu}_l) n_e \quad (3.20)$$

Datorită gradului de ionizare scăzut în faza de start, rata pierderilor este definită de difuzia electronilor :

$$\gamma_1 = \frac{K \cdot T_e}{m_e v_c} \Lambda^{-2} \tag{3.21}$$

în care; lungimea de difuzie Λ a electronilor este dată de relația /83/:

$$\Lambda^{-2} = \left(\frac{4,8}{d_f}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \tag{3.22}$$

l - fiind valoarea lungimii absorbante. Multiplicarea exponențială a electronilor

$$n_e = n_0 e^{\gamma_i \cdot z} \tag{3.23}$$

are loc cînd pierderile prin difuzie sînt mai mici decît producerea de electroni

$$\gamma_i = \gamma_i^0 - \gamma_1 > 0 \tag{3.24}$$

Densitatea critică a electronilor n_c , este valoarea densității electronilor n_e pentru care lungimea Dabye se apropie de domeniul geometriei focarului.

$$\Lambda_D = \frac{1}{e} \frac{K \cdot T_e \cdot \epsilon_0}{n_e} \leq \frac{d_f}{2} \tag{3.25}$$

În aceste condiții vaporii ionizați parțial din volumul focarului se pot considera drept plasmă.

Vaporizarea materiei solide și încălzirea fazei gazoase la microplasmă este un proces autoregulator, care printr-o cuplare optimă a plamei și tinteii permite incorporarea unei energii maxime a laserului în materia condensată.

Considerînd că energia de ionizare a materiei condensate (E_1) este constantă se poate calcula intensitatea de prag, care în aceste condiții este denumită intensitate critică, pentru cele două tipuri de lasere utilizate. În relația de calcul a intensității critice /81/ se înlocuiesc mărimile caracteristice laserului cu CO_2 și a laserului cu mediu activ format deci sticlă dopată cu

$$I_c \cong \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot m_e \cdot c_0}{e^2} \cdot \ln \left(\frac{n_c}{n_0} \right) \cdot \frac{(E_i + E_0) \omega}{Z_a} \quad (3.26)$$

Nd³⁺ (valori experimentale) /99/

CO ₂ : $\lambda = 10,59 \mu\text{m}$	Nd ³⁺ : $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$
$E_0 = 13 \text{ eV}$	$E_0 = 3 \text{ eV}$
$\omega = 1,78 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	$\omega = 1,78 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$
$Z_a = 2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$	$Z_a = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

S-a notat Z_a - timpul de producere a avalanșei de electroni;
 E_0 - energia cinetică medie a electronilor.

Cu aceste valori se obține pentru intensitatea de prag (critică) valoarea

$$I_p = I_c \cong 10^8 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \quad (3.27)$$

Se pot determina de asemenea /90,99/ densitatea de energie critică

$$Q_c = \frac{I_c \cdot Z_c}{I_c} = Q_v = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3} \quad (3.28)$$

În intervalul de timp $Z_c = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$, precum și lungimea absorban-
 ta critică $l_c = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$, în volumul de interacțiune dat de re-
 lația (3.17)

3.3. Prelevarea de material cu fascicul laser focalizat

3.3.1. Incălzirea materialului

Ecuția transmiterii de căldură unidimensională în cazul unui material omogen, izotrop, neavînd sursă proprie de căldură este dată de relația /53, 83, 85, 93/:

$$\frac{\partial^2 I(z, Z)}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial I(z, Z)}{\partial Z} = - \frac{1}{\lambda} \cdot f(z, Z) \quad (3.29)$$

în care: z - direcția de propagare a fluxului termic,
 a - difuzivitatea termică a materialului,
 $\lambda = \rho \cdot c \cdot a$ - conductibilitatea termică a materialului,
 c - căldura specifică termică a materialului,
 ρ - densitatea materialului,
 $f(z, Z)$ - fluxul termic la suprafața materialului.

Presupunând că pulsul laser este uniform distribuit cu o întindere infinită în planul x-y, pentru un material cu suprafața la z=0 se obține pentru ecuația (3.29) următoarea soluție /78,83,85/:

$$T(z, Z) = \frac{2I_0}{\lambda} \sqrt{a \cdot Z} \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a \cdot Z}} \right) \quad (3.30)$$

Intr-o geometrie sferică soluția ecuației (3.29) este :

$$T(r, Z) = \frac{I_0 \cdot r_t}{2\lambda \cdot r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r - r_t}{2\sqrt{a \cdot Z}} \right) \quad (3.31)$$

În relațiile (3.30) și (3.31) erfc și ierfc reprezintă funcția normală de distribuție a erorilor a lui Gauss, respectiv, integrala acesteia;

r_t - raza zonei de prelucrare; r-coordonata de poziție radială. Temperatura la suprafața probei (z=0) este :

$$T(0, Z) = \frac{2I_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a \cdot Z}{\pi}} \quad (3.32)$$

și depinde de intensitatea I a radiației laser $[I_0 = I(1-R)]$, de gradul de absorbție (A=1-R) și de durata impulsului laser Z.

3.3.2. Topirea și vaporizarea materialului

Prin intermediul radiației laser materia este încălzită, devine lichidă și apoi este vaporizată. După un timp Z_v de la începutul acțiunii laserului, suprafața materialului a ajuns la temperatura de vaporizare. Acest timp se poate calcula din relația (3.32) după formula :

$$Z_v = \frac{\pi}{4a} \cdot \left(\frac{T_v^* \cdot \lambda}{I} \right)^2 \approx \frac{h_0^2}{a} \quad (3.33)$$

în care; h_0 - adâncimea tăpăturii ($\partial T / \partial z = 0$),

$$T_v^* = T_v + \frac{\lambda \nu}{c} \quad (3.34)$$

Frontul topit a ajuns pînă la adâncimea :

$$h_0 = \frac{\lambda (T_v^* - T_t^*)}{I_0} \quad (3.35)$$

$$T_t^* = T_t + \frac{\lambda_t}{c} \quad (3.36)$$

λ_v și λ_t fiind respectiv căldura de vaporizare și căldura de topire a materialului, T_t - temperatura de topire a materialului.

Această zonă topită este delimitată de un front de topire

$T(h_0, Z) = T_t^*$ și de un front de vaporizare $T(0, Z) = T_v^*$.

În cazul modelului staționar ($\partial/\partial Z = 0$ și unidimensional se poate determina viteza suprafeței de separație dintre cele două fronturi:

$$v_s = \frac{l_0}{\rho [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t]} = \frac{T_0}{Q_v} \quad (3.37)$$

Considerînd și randamentul transiterii de căldură în acest caz η_0 , care corespunde gradului de absorbție al materiei condensate A_{g^*} , se poate determina valoarea vitezei de îndepărtare a materialului:

$$v_1^0 = \eta_0 \frac{l_0}{Q_v} = \eta_0 \frac{l_0}{\rho [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t]} \quad (3.38)$$

Fluxul de căldură absorbit de suprafața plană a materialului ($f_0 = I_0$) este transferat prin intermediul suprafeței de separație dintre faza lichidă și faza solidă, în cazul modelului tridimensional, în interiorul materiei solide. Dacă notăm cu r_t - raza zonei topite atunci mărimea acestui flux este dată de relația:

$$f_r = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_t}{r_0} \right)^2 \cdot I_0 \quad (3.39)$$

Prezența în materialul de bază a acestui flux de căldură determină modificarea geometriei semisferice inițiale a topiturii fig (3.3). Se obține astfel o topitură de formă cilindrică cu o rază $r_t \geq r_0$, rază ce depinde de energia absorbită de material. Fluxul de căldură f_r modifică atât adîncimea topiturii h_0 cît și viteza de îndepărtare v_1^0 , stabilite pentru modelul unidimensional. Acestea se impune a fi corectate, factorul de corecție K poartă denumirea de factorul pierderilor de căldură și este definit cu relația; /83/

$$K = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{r_t}{\lambda (T_v^* - T_t^*)} \right]^2 \cdot I_0^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_t}{h_0} \right)^2 \quad (3.40)$$

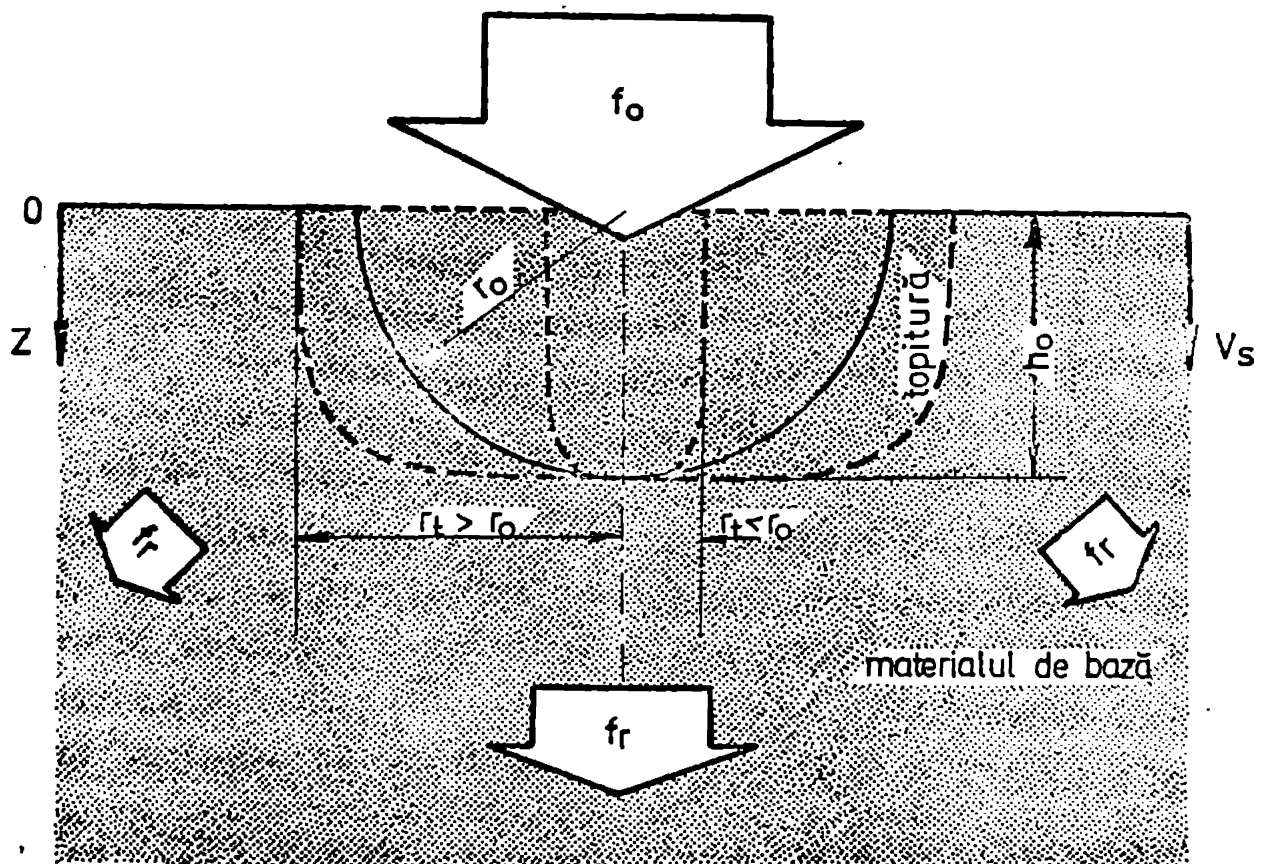


Fig. 3.3. Reprezentarea schematică a geometriei de topire

Se vede din relația (3.40) că:
 pentru :

$$\begin{aligned}
 r_t < h_0 & \dots\dots\dots \frac{1}{2} < K < 1 \\
 r_t = h_0 & \dots\dots\dots K = \frac{1}{2} \\
 r_t = \sqrt{2} h_0 & \dots\dots\dots K = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.41}$$

Valorile corectate ale adâncimii topiturii h_k , vitezei de îndepărtare v_I^k și randamentului η_k sînt respectiv :

$$h_k = \frac{h_0}{1-K}
 \tag{3.42}$$

$$v_I^k = (1-K) v_I^0
 \tag{3.43}$$

$$\eta_k = (1-K) \eta_0
 \tag{3.44}$$

Analizând relațiile (3.40) se poate observa că pentru diametre de topire mici ($r_t < h_0$) se obțin pierderi de căldură ridicate, pierderi ce apar ca urmare a procesului de transmitere radială a căldurii. Aceste pierderi de căldură pot fi neglijate dacă $r_t > h_0$, adică la diametre mari ale topiturii; iar intensitatea activă I_0 de pe suprafața corpului solid se poate considera că este transmisă integral acestuia.

Factorul (1-K) poartă denumirea de randament al căldurii și ne indică fracțiunea din energia laserului absorbită ce ne stă la dispoziție în procesul de îndepărtare după direcția Z

3.3.3. Îndepărtarea fazei lichide

Cantitatea de vapori care se formează la suprafața materialului ca urmare a procesului de evaporare intensivă, exercită asupra acestei topituri o presiune p, presiune ce determină o deplasare radială a lichidului. Are loc astfel o expulzare a fazei lichide de la locul de interacțiune dacă forța pe suprafață exercitată de presiunea vaporului este mai mare decât forța totală a stării lichide:

$$F_s > F_{tot} \quad (3.45)$$

Forța pe suprafață depinde de presiunea p a vaporilor și de diametrul d_t al îndepărtării; (fig.3.4)

$$F_s = \frac{\pi \cdot p \cdot d_t^2}{4} \quad (3.46)$$

iar forța totală a stării lichide se compune din :

$$F_{tot} = F_p + F_c + F_{rs} \quad (3.47)$$

unde :

$$F_p = \pi \cdot \rho \cdot g \cdot d_t \cdot h_t \cdot h \quad - \text{forța potențială,}$$

$$F_c = \pi \cdot \mu \cdot v_l \cdot d_t \cdot \frac{d_t + 2h}{h_t} \quad - \text{forța capilară, (3.48)}$$

$$F_{rs} = 2 \pi d_t \cdot \sigma \quad - \text{forța pentru învingerea rezistenței de suprafață.}$$

În relațiile (3.48) /83/ s-au notat :

ρ - densitatea materiei solide considerată egală cu cea a fazei gazease,

g - accelerația gravitațională,

d_t, h_t, h - parametrii geometrici ai îndepărtării (fig. 3.4),

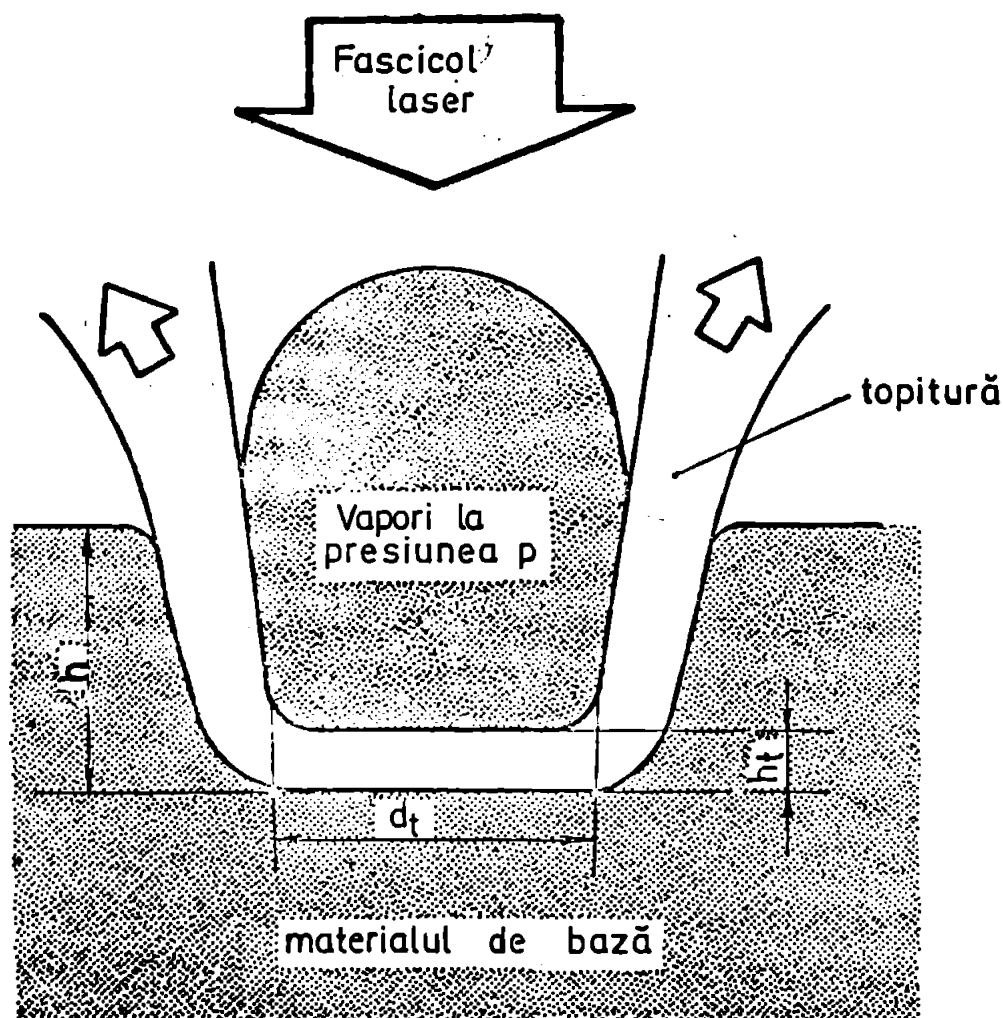


Fig. 3.4. Reprezentarea schematică a îndepărtării lichidului

$$v_l = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} - \text{viteza de deplasare a fazei lichide,}$$

$$\sigma - \text{rezistența suprafeței,}$$

$$\mu - \text{vîscozitatea.}$$

Dacă nu se ține cont de forța potențială F_p , ea fiind mult mai mică decît suma celorlalte două forțe ($F_p \ll F_c + F_{rs}$), condiția (3.45) devine :

$$F_s \gg F_c + F_{rs} \quad (3.49)$$

La îndeplinirea acestei condiții faza lichidă este îndepărtată de-a lungul suprafeței de separație dintre faza lichidă și faza gazoasă. Înlocuind în relația (3.49) relațiile (3.46) și (3.48) se obține valoarea presiunii vaporilor necesară pentru îndepărtarea fazei lichide :

$$p \gg \frac{4}{d_t} \left[\mu \cdot v_l \cdot \frac{d_t + 2h}{h_t} + 2\sigma \right] \quad (3.50)$$

In urma acțiunii fasciculului laser se îndepărtează deci o anumită cantitate de material formându-se un crater. Masa totală a îndepărtării poate fi considerată ca fiind compusă dintr-o cantitate de material vaporizat și o cantitate de lichid:

$$M = M_v + M_l \quad (3.51)$$

Dacă notăm cu $D = \frac{M_v}{M}$ - cantitatea relativă de vapori și cu $L = \frac{M_l}{M}$ cantitatea relativă de material lichid din masa îndepărtării, relația (3.51) devine:

$$L + D = 1 \quad (3.52)$$

In aceste condiții energia totală necesară îndepărtării unității de volum de material se determină cu relația:

$$Q = L \cdot Q_l + D \cdot Q_v \quad (3.53)$$

în care;

Q_l - densitatea de energie necesară îndepărtării lichidului,
 Q_v - densitatea de energie necesară îndepărtării materiei vaporizate.

Q_l se calculează cu relația:

$$Q_l = \rho \left[c(T_v - T_o) + \lambda_t \right] \quad (3.54)$$

iar Q_v cu relația (3.18).

Viteza de îndepărtare determinată în cazul staționar (vezi relația 3.38) capătă forma:

$$v_s = \frac{I_o}{Q} = \frac{I_o}{D \cdot Q_v + L \cdot Q_l} = v_{il} \quad (3.55)$$

Făcînd raportul relațiilor (3.37) și (3.55) obținem coeficientul a , denumit factor de îndepărtare a lichidului:

$$a = \frac{v_{il}}{v_s} = \frac{Q_v}{D \cdot Q_v + L \cdot Q_l} = \frac{\frac{Q_v}{Q_l}}{D \left(\frac{Q_v}{Q_l} - 1 \right) + 1} \quad (3.56)$$

a cărei valoare, așa cum se poate deduce din relația (3.56) variază în intervalul:

$$1 < a < \frac{Q_v}{Q_l} \quad (3.57)$$

Dacă $D = 1$ și $L = 0$ se obține $a = \frac{1}{Q_1}$, iar dacă
 $D = 0$ și $L = 1$ se obține $a = \frac{Q_1}{Q_2}$

Se impune deci corectarea valorilor determinate în cazul staționar ținând cont de valoarea factorului de îndepărtare a lichidului. Astfel, adâncimea topiturii h_0 și randamentul îndepărtării au respectiv valorile :

$$h_t = \frac{h_0}{a} \quad ; \quad \eta_t = a \cdot \eta_0 \quad (3.58)$$

Factorul de îndepărtare "a" și cantitatea de abur sînt dependente de presiunea p de pe suprafața topiturii, presiune ce depinde de intensitatea laserului și de lungimea sa de undă. În concordanță cu proprietățile radiației laser, presiunii de pe suprafața unei topituri îi corespunde presiunea de vapori p_v a materiei. Creșterea presiunii vaporilor de la $p = p_v$ la presiunea de detonație $p = p_d$ are loc la depășirea intensității de prag $I_p = 10^8 \text{ W/cm}^2$. Deci la $I < I_p$ îndepărtarea fazei lichide se face la o presiune $p = p_v$ iar pentru $I > I_p$ se atinge valoarea presiunii de detonație, presiune de care depinde atât cantitatea de vapori D cît și factorul de îndepărtare a .

3.3.4. Indepărtarea fazei gazoase

Sub acțiunea radiației laser materia solidă este transformată în stare de vapori. Dacă considerăm că stratul de material aflat în stare topită face parte din materialul de bază (deci neglijăm faza lichidă), într-un model staționar ($\partial/\partial z = 0$), se poate determina densitatea vaporilor cu relația :

$$\rho_v = \rho \cdot \frac{v_i^0}{v_v} \quad (3.59)$$

în care, v_v - viteza vaporilor.

Radiația laser vine în contact cu acest nor de aburi și este absorbită. Prin absorbția radiației laser norul de abur este parțial ionizat.

S-a văzut că gradul de absorbție al norului de abur depinde de densitatea de electroni a acestuia. Ori, densitatea de electroni este dependentă de gradul de ionizare :

$$\eta_i = \frac{n_e}{n_n + n_i} = \frac{n_e}{n_s} \quad (3.60)$$

în care; n_n - densitatea particulelor neutre,
 n_i - densitatea ionilor,
 n_s - densitatea particulelor în faza inițială a stării gazoase.

Ținând cont de relația (3.59) din relația (3.60) se poate determina densitatea de electroni a norului de abur în stare ionizată:

$$n_e = \eta_i \cdot \rho_v \cdot \frac{L}{A} = \eta_i \cdot \rho \cdot \frac{v_i^0}{v_v} \cdot \frac{L}{A} \quad (3.61)$$

în care:

$L = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ - numărul Loschmidt,

A - raportul dintre masa atomică și masa moleculară a substanței.

Cu această valoare a densității electronilor (3.61) valoarea coeficientului de absorbție α dat de relația (3.15) devine :

$$\alpha_v \approx \eta_i \cdot \frac{\gamma_c}{c_0 \cdot \omega^2} \cdot \frac{e^2}{m_e \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{L}{A} \cdot \frac{I_{os}}{v_v [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t]} \quad (3.62)$$

I_{os} fiind densitatea de putere necesară vaporizării corpului solid ($I_{os} = I_0$ dacă $\alpha \cdot l < 1$) și se calculează cu relația :

$$I_{os} = (1 - A_v) I_0 \quad (3.63)$$

A_v este gradul de absorbție al vaporilor. Norul de abur se va deplasa cu o viteză v_v ce poate fi considerată egală cu viteza de detonație /83/:

$$v_d = \left[\frac{2}{\rho_0} (\kappa^2 - 1) I_{ov} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.64)$$

în care:

ρ_0 - densitatea mediului în care are loc prelucrarea,

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ - exponentul adiabatic,

I_{ov} - densitatea de putere absorbită în plasmă.

Densitatea de putere absorbită de corpul solid depinde de gradul de absorbție al materiei solide și gradul de absorbție al aburului (rel.3.63). Cum densitatea de putere absorbită de plasmă depinde de gradul de absorbție al materiei gazoase A_v și de intensitatea I a radiației laser ($I_{ov} = A_v \cdot I$) se poate determina relația de dependență între cele două intensități I_{os} și I_{ov} :

$$I_{os} = \frac{1 - A_v}{A_v} I_{ov} \quad (3.65)$$

Ținînd cont de relațiile (3.64) și (3.65), relația coeficientului de absorbție în norul de abur ionizat devine :

$$\alpha_v \cong \eta_i \cdot \frac{\gamma_c}{c_0 \cdot \omega^2} \cdot \frac{e^2}{m_e \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{L}{A} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{2(\kappa^2 - 1)}} \cdot \frac{1 - A_v}{A_v} \cdot \frac{I_{ov}^{\frac{2}{3}}}{c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t} \quad (3.66)$$

Prin absorbția în continuare a radiației laser se produc densități de energie ridicate într-un interval de timp foarte scăzut. Sistemul plasmă - mediu înconjurător nu mai este în echilibru și apare, ca urmare a acestui surplus de energie, o expansiune a plasmăi. Energia termică se transformă în energie cinetică care determină apariția expansiunii norului de abur. Viteza de expansiune este determinată de energia laserului. Această viteză este în general mai mare decât viteza sunetului în mediul în care se produce plasma. Expansiunea ca viteză sonică poartă denumirea de expansiune prin șoc sau detonație. Viteza v a frontului de șoc se poate determina din relațiile de bază ale hidrodinamicii pentru șocuri perpendiculare și este dependentă de energia exterioară transmisă volumului de plasmă :

$$Q = Q_0 - (Q_{ion} + Q_{rad}) \quad (3.67)$$

în care:

Q_0 - energia laserului absorbită pe unitatea de volum,

Q_{ion} - energia de ionizare pe unitatea de volum,

Q_{rad} - energia de radiație pe unitatea de volum.

Cu aceasta valoare a lui Q viteza frontului de șoc este :

$$v = \sqrt{\frac{2Q(\kappa^2 - 1)}{\rho_0} \left(1 - \frac{Q_{ion} + Q_{rad}}{Q}\right)} \quad (3.68)$$

În care:

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ exponent adiabatic.

Dacă energia de radiație și ionizare sînt neglijabile în raport cu energia absorbită ($Q_{ion} + Q_{rad} \ll Q$) relația vitezei frontului de șoc devine;

$$v \approx \sqrt{\frac{2Q(\gamma^2 - 1)}{\rho_0}} \quad (3.69)$$

iar dacă considerăm că extinderea se face după direcția de acțiune a radiației laser (cazul unidimensional) se obține viteza de detonație dată de relația (3.64)

Presiunea de detonație rezultată din expansiune este dată de relația /83/ :

$$P_d = \frac{\rho_0}{\gamma + 1} \cdot v_d^2 \quad (3.70)$$

iar poziția frontului de detonație la timpul τ de relația :

$$z_d = \tau \cdot \sqrt{\frac{2I_{0v}}{\rho_0} (\gamma^2 - 1)} \quad (3.71)$$

In cazul unei geometrii cilindrice pentru expansiune, coordonata de poziție radială r_c la timpul τ este :

$$r_c = \left\{ r_f^2 + 2\tau \left[\frac{2(\gamma^2 - 1)}{\rho_0} \cdot \frac{I_{0v} \cdot r_f^2 \cdot \tau_a}{l} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.72)$$

iar viteza :

$$r'_c = \left[\frac{2(\gamma^2 - 1)}{\rho_0} \cdot \frac{I_{0v} \cdot r_f^2 \cdot \tau_a}{l \cdot r^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.73)$$

în care:

- r - coordonata de poziție radială,
- r_f - raza focarului,
- τ_a - timpul de absorbție,
- l - lungimea absorbantă,
- ρ_0 - densitatea mediului înconjurător.

In cazul unei geometrii sferice pentru aceiași parametri obținem respectiv relațiile :

$$r_s = \left\{ r_0^2 + \frac{5}{3} \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{2(\gamma^2 - 1)}{\rho_0} I_{0v} \cdot r_f^2 \cdot \tau^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{5}} \quad (3.74)$$

$$r'_s = \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{2(\gamma^2 - 1)}{\rho_0} \cdot \frac{I_{0v} \cdot r_f^2 \cdot \tau}{r^3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.75)$$

Valoarea corectată a randamentului îndepărtării ținând cont de transmiterea radială a căldurii, de îndepărtarea fazei lichide precum și de absorbția norului de vapori și a materialului de bază este :

$$\eta_c = a(1-K)(1-A_v)A_s \quad (3.76)$$

O reprezentare grafică a relației randamentului (3.76) este redată în fig.3.5 /83/ pentru domeniul de intensitate $I \in [10^7, 10^9] \text{ W/cm}^2$

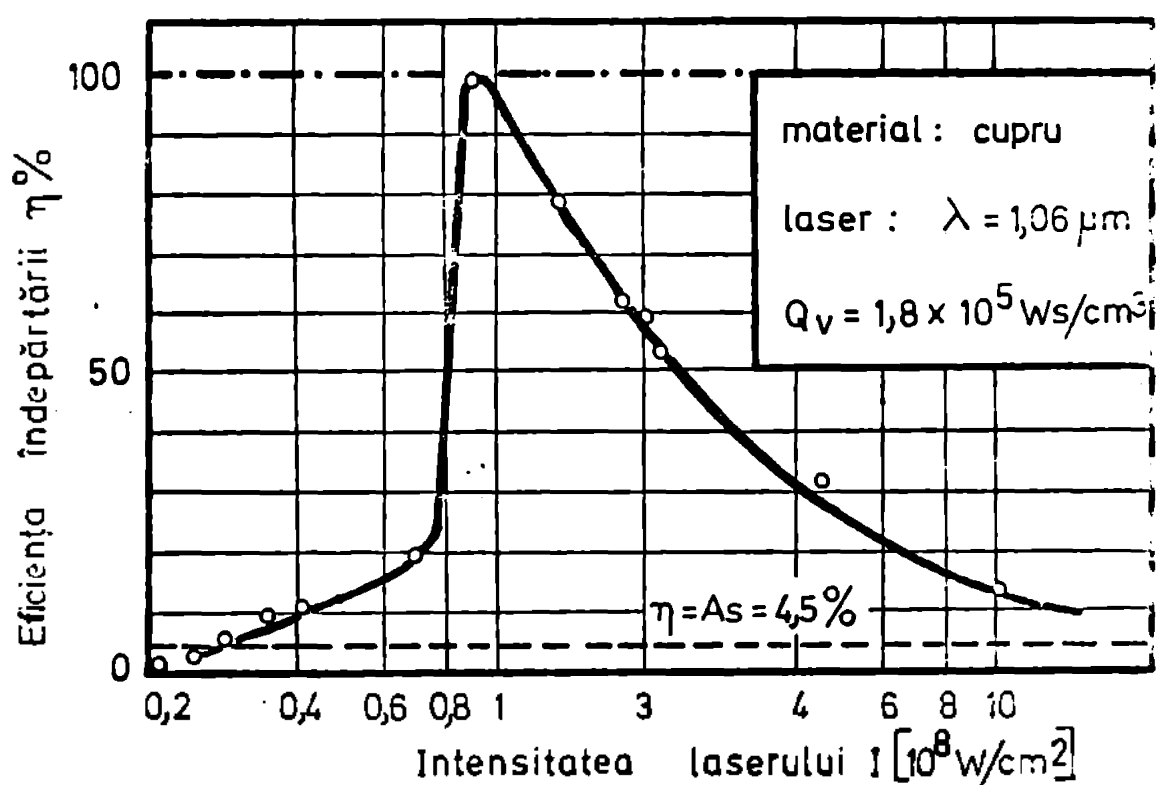


Fig. 3.5. Eficiența îndepărtării în funcție de intensitatea radiației laser

Din figură se poate observa că la valori ale intensității radiației laser sub $3 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$, randamentul îndepărtării scade sub valoarea gradului de absorbție al materiei solide, ca urmare a pierderilor prin transmitere radială a căldurii.

La creșterea intensității radiației peste această valoare, randamentul crește ca urmare a îndepărtării tot mai pronunțate a fazei lichide.

Valori ale intensității cuprinse între $6 \cdot 10^7$ și 10^8 W/cm^2 determină o creștere a gradului de absorbție al materialului de bază pînă la 100%, pierderile prin transmisie radială și îndepărtarea a fazei lichide sînt neglijabile.

Aproape întreaga cantitatea de căldură este utilizată pentru îndepărtare, randamentul apropiindu-se de 100%.

Depășirea intensității de 10^8 W/cm^2 determină o scădere a randamentului datorită absorbției pronunțate a vaporilor $A_v > 0$. Prelucrarea cuprului cu radiație laser avînd $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ are deci eficiență maximă la intensități cuprinse între $6 \cdot 10^7$ și $2 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$.

Cercetările experimentale efectuate /7,24/ au arătat că în procesul de găurire cu laser partea fazei gazoase ce este expulzată de la locul de interacțiune este mare numai în perioada inițială (50 - 100 μs) a impulsului laser. Mai tîrziu este predominantă aruncarea fazei lichide din craterul ce se formează. La densități de putere mai mari decît 10^8 W/cm^2 presiunea vaporilor crește la valori foarte mari, (100 atm) atingîndu-se presiunea de detonație, ce determină o aruncare puternică a materialului din crater.

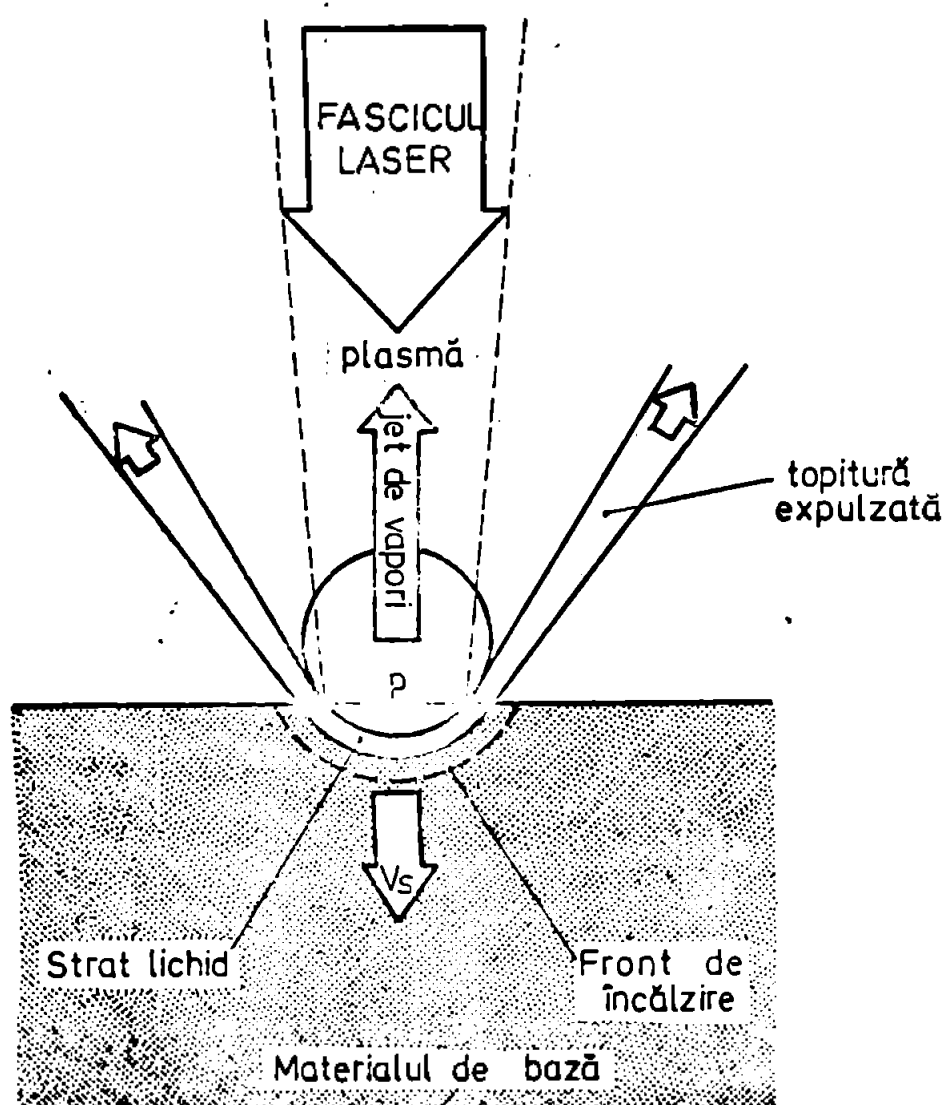


Fig. 3.6. Reprezentarea schematică a prelevării de material.

Aruncare intensivă a vaporilor condensati creează o reducere a temperaturii și presiunii după care procesul se repetă, apărînd cîteva aruncări succesive în timpul unui impuls laser.

Este necesar deci, ca la interacțiunea radiației laser cu materia solidă să se țină seama de influența vaporilor de material ce apar în timpul procesului. Intensitatea radiației ce acționează asupra suprafeței țintei este micșorată prin absorbția parțială a acesteia în norul de vaporii /5/. În acest nor apare o depășire a intensității de prag ceea ce favorizează apariția unei microplazme (fig.3.6). Radiația laser este absorbită în această fază în totalitate de către plasmă, materia solidă fiind ecranată. Energia absorbită de plasmă este transmisă integral materiei condensate. Viteza de expansiune a norului de abur ionizat crește pînă la viteza de detonație $v_D > 10^6$ cm/s /78,99/.

Presiunea topiturii ce apare crește pînă la valoarea presiunii de detonație $p=p_d$ /14,99/ și ca urmare o parte din topitură de pe suprafața de separație dintre materia gazoasă și cea solidă este îndepărtată /5/.

Dacă fenomenele ce apar sînt descrise în modelul prezentat pentru operațiile de găurire, în procesul de tăiere interacțiunea radiației laser cu materia este esențial influențată de prezența în procesul de tăiere a unui gaz ajutător.

La descrierea procesului de tăiere ar fi suficientă teoria obișnuită a conducției termice, însă reacțiile chimice exotermice și endotermice care au loc în timpul tăierii modifică esențial cantitatea de căldură ce apare în material.

Prezența fenomenelor de aruncare din crater sau tăietură a materialului topit, și solidificarea acestuia la marginea craterului, respectiv tăieturii dau un aspect inestetic al locului de realizare a prelucrării .

4. APARATURA EXPERIMENTALA UTILIZATA LA PRELUCRAREA DIMENSIONALA CU FASCICUL LASER FOCALIZAT

Apărut ca rezultat al cercetărilor fundamentale în domeniul fizicii, laserul s-a dovedit a fi, în cei 25 de ani de la apariție, una din descoperirile remarcabile ale secolului nostru. Laserul este o sursă de lumină amplificată printr-un proces fizic, enunțat de Einstein încă din 1917, procesul de emisie stimulată a luminii. În cadrul laboratoarelor de cercetări Hughes din S.U.A., T.H.Maiman construiește primul dispozitiv laser în anul 1960, folosind drept mediu activ un cristal de rubin sintetic.

În acest sfert de veac de la apariția primului laser, noul domeniu al fizicii denumit fizica laserului, cunoaște o dezvoltare nemaîntâlnită; diversitatea laserilor construiți fiind impresionantă. S-au studiat sute de tipuri de lasere, mii de laboratoare studiază aplicabilitatea acestora, zeci de firme produc astăzi laseri iar domeniile și numărul aplicațiilor specifice depășesc cu mult previziunile cele mai optimiste ale primilor constructori de astfel de generatoare.

Proprietățile remarcabile ale fasciculului laser au atras imediat atenția cercetătorilor din domeniul tehnologiilor de prelucrare a materialelor.

În țara noastră, principalele activități de cercetare, în domeniul construcției și utilizării laserilor se desfășoară în Secția "Lasere" a Institutului de Fizică și Tehnologia Aparatelor cu Radiații. În ultimii ani a luat ființă și un laborator care studiază și produce mediile active necesare fizicii și tehnologiei laserilor. Trebuie remarcat că țara noastră se numără printre primele din lume în care se desfășoară o activitate laser intensă. Astfel, la Institutul de Fizică Atomică din București (actualul I.F.T.A.R), sub conducerea profesorului Ioan Agărbiceanu, se construiește primul laser românesc încă în anul 1962. Acest prim laser a avut mediul activ format dintr-un amestec de gaze: heliu și neon. Cinci ani mai târziu, în 1967, se pune în funcțiune, la

același institut, primul laser românesc de putere (100 W) avînd ca mediu activ CO_2 și primul laser românesc cu argon ionizat. Următorul grup de laseri, laserii de mare putere cu mediu activ solid, a fost abordat cu succes la noi în țară în anul 1968.

De la construcția acestor prime generatoare și amplificatoare cuantice, în cadrul Programelor de Laseri și Aplicații pe baza cărora se desfășoară activitatea laser în țara noastră, secția "Laseri" a I.F.T.A.R-ului a cunoscut o perioadă deosebit de prolifică. Se construiesc astăzi, la acest institut: laseri cu HeNe în variante monomod și multimod; laseri cu bioxid de carbon cu emisie în undă continuă avînd puterea cuprinsă între 5 W și 2.000W și cu emisie în impulsuri (1 μs) de mare energie 1-20 J; laseri cu mediu activ solid din sticlă dopată cu neodim, granat de itriu și aluminiu dopat cu indiu, precum și rubinul; laseri cu colorant (acordabili); laserii cu argon ionizat sau kripton ionizat cu puteri de la 1 la 10 W.

Preocupări pentru aplicarea laserului în procesul de prelucrare dimensională au început la Facultatea de Mecanică din Timișoara odată cu construcția în țară a primului laser de putere (1969). A fost înființat un laborator "Laser" care, în prezent, este dotat cu mai multe tipuri de generatoare produse în țară. Deoarece pentru aplicații în domeniul prelucrării materialelor se pretează doar laserii de putere, în continuare se prezintă caracteristicile constructive ale acestora.

4.1. Generatoare și amplificatoare cuantice pe care s-au realizat experimentările

Toate încercările experimentale ale căror rezultate sînt prezentate în prezenta lucrare au fost realizate pe instalații laser de producție românească, unele rezultate fiind comparate cu date obținute de cercetători în acest domeniu pe laseri similari dar de altă fabricație. Astfel, încercările privind procesul de găurire a tablelor din oțel inoxidabil 20 Cr 130 s-au efectuat pe instalațiile "Neodim 15" aflate în dotarea laboratorului "Laser" al Facultății de Mecanică respectiv a Intreprinderii de Aparate Electrice de Măsură Timișoara, iar încercările privind tăierea materialelor metalice și nemetalice precum și încercările privind decalotarea produselor din sticlă s-au efectuat pe instalații laser cu bioxid de carbon :

FC 100, monomod de 100 W (LIR 100), laserul cu circulație transversală a amestecului precum și pe laserul cu tuburi în Z aflat în dotarea Intreprinderii Electroputere din Craiova.

4.1.1. Instalația laser "Neodim 15"

"Neodim 15" este denumirea instalației de microprelucrări cu laser cu sticlă dopată cu neodim (tab.4.1). Laserul funcționează în impulsuri avînd durata unui impuls de ordinul 5-10 μ s și lungimea de undă a radiației $\lambda = 1,06 \mu$ m (infraroșu).
Principalele elemente componente ale instalației (fig.4.1) sînt:

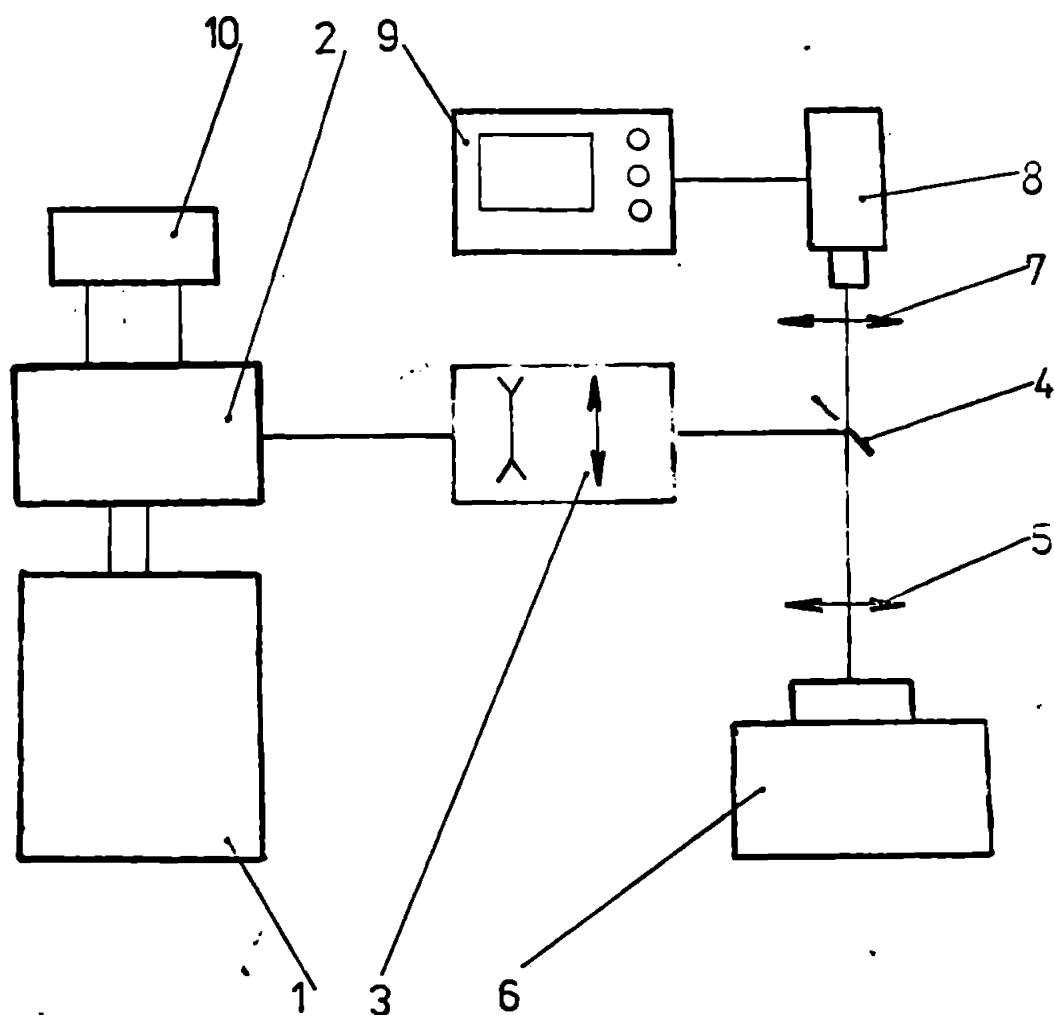


Fig. 4.1. Schema bloc a instalației de microprelucrări Neodim 15.

a) Sursa instalației de microprelucrări (1) SEM - 3000 este destinată alimentării laserului cu o tensiune continuă, reglabilă în intervalul de la 300 la 3.000 V. Ea se alimentează de la rețeaua de 220 V, 50 Hz și conține ca elemente principale: un autotransformator ATB-18, un transformator ridicător de tensiune,

INSTALATIA LASER „NEODIM 15”
- CARACTERISTICI -

LASERUL PROPRIUZIS	Regim de funcționare	In impulsuri	
	Lungimea de undă	1,06 μm (infrarosu)	
	Configurația modală	Multimod	
	Diametrul fascicolului	10 mm	
	Durata unui impuls	5 ÷ 10 μs	
	Energia unui impuls	max. 15 J	
	Mediul activ	Sticla dopata cu Nd ³⁺	
	Lampa flash	VQX 15-15 type E	
	Focalizarea	Luneta GALILEI, si obiectiv cu : f ₁ = 30mm ; f ₂ = 60mm.	
	Sistem de racire	Apa distilata cu pompa de recirculare proprie	
SISTEMUL DE ALIMENTARE	Tensiunea de alimentare	220V ; 50 Hz	
	Tensiunea furnizata	300 ÷ 3000V	
	Puterea absorbita de la retea	De la 1000 VA la 3000 VA	
	Durata de descarcare a condensatorilor	1 sec.	
	Impulsul de aprindere	25 KV ; 50 uF	
	Regimul programatorului	Manual	Se aplică impuls de aprindere la comanda operatorului.
		Periodic	Se aplică impuls de aprindere cu perioadă de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s.
Automat cu stop program		Se aplică un număr de impulsuri de la 1 la 10 cu perioadă de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s.	

Tab 4.1 INSTALATIA LASER „NEODIM 15” - CARACTERISTICI

doi condensatori de 450 μ F fiecare, un programator și aparatul de comandă și urmărire a principalilor parametri. Programatorul poate avea următorul mod de lucru :

- manual, când impulsul de aprindere se aplică la comanda operatorului;
- periodic, se aplică impulsuri de aprindere cu perioade de repetiție de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s, 60s;
- automat cu stop program când se aplică un număr de impulsuri de la 1 la 10, intervalul dintre două impulsuri fiind unul din cele prezentate anterior.

b) Laserul propriuzis (2), format dintr-o cavitate eliptică fin lustruită la interior și confecționată din două bucăți metalice ce se assemblează de-a lungul axei mari a elipsei; cavitate în care se montează mediul activ și lampa flash.

Energia maximă eliberată de laser este de 15 J și este funcție de tensiunea de descărcare și de capacitățile introduse în circuit.

c) Colimatorul (3) format dintr-o lunetă Galilei compusă din două lentile (una convergentă și alta divergentă) depuse antireflex.

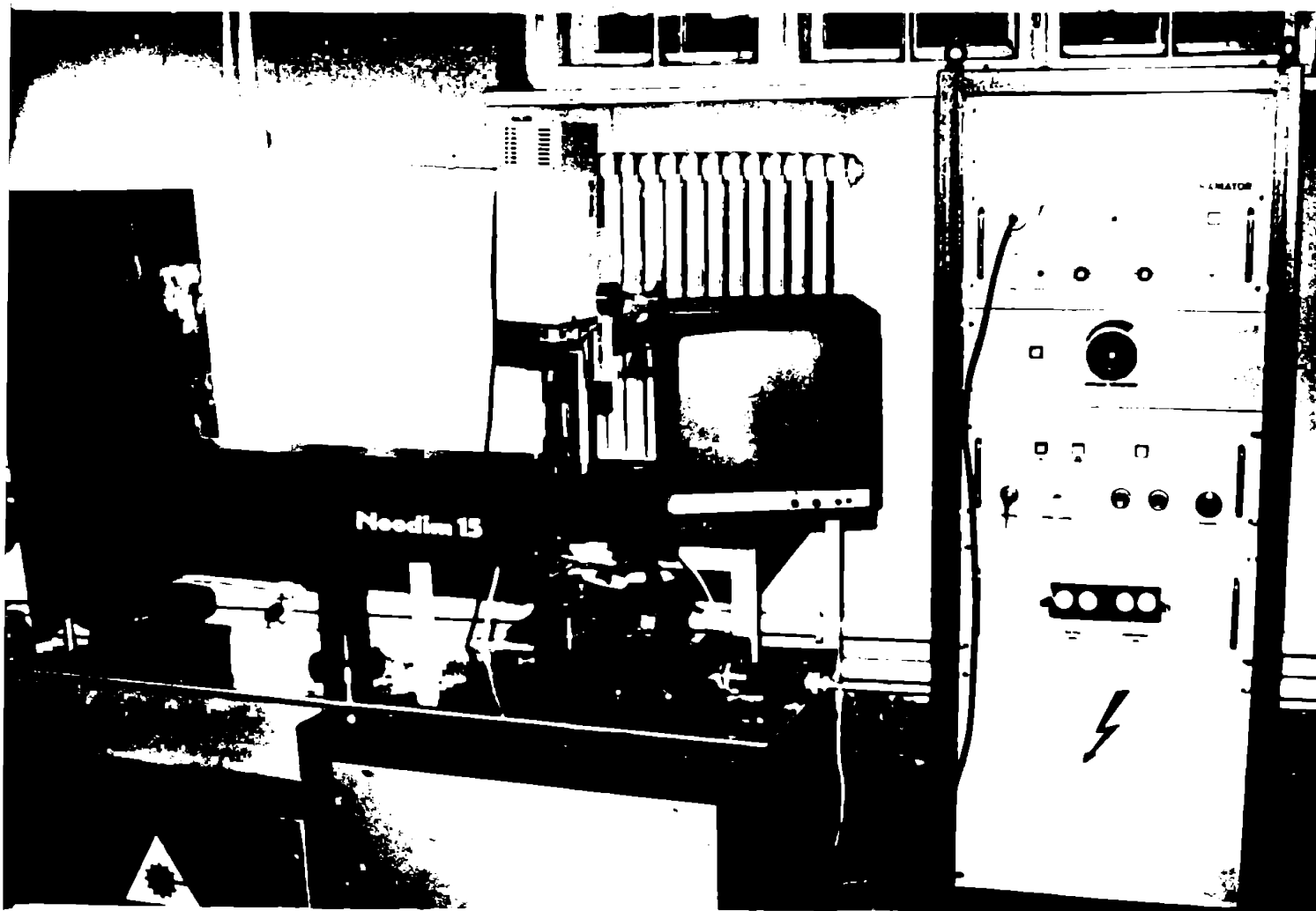


Fig.4.2. Instalația laser "Neodim 15"

d) Oglindă pentru devierea fasciculului la 45° (4), confecționată din oțel inoxidabil și depusă în vid cu un strat de argint, poate executa o mișcare de translație făcând posibilă vizualizarea piesei, respectiv a locului prelucrării prin ocularul 7.

e) Obiectivele laserului (5), sînt obiective cu mărirea de 7x și au respectiv distanțele focale de 30 și 60 mm.

f) Masa port obiect (6) este un stativ de microscop MC 3 și oferă mișcări de poziționare manuale după coordonatele x,y,z.

g) Ocularul instalației (7) este prevăzut cu un reticul în cruce și mărește de 7x.

h) Cameră (8) și monitor (9) ^{IV.} care permit controlul procesului de prelucrare.

i) Pompa cu apă distilată (10) asigură răcirea lămpii flash și a bastonului, la un debit de 3 l/min.

În fig.4.2 este prezentată o vedere de ansamblu a instalației.

4.1.2. Laserul cu bioxid de carbon multimod FC 100

Instalația FC 100 este un laser ce funcționează cu un amestec de gaze format din CO_2 , N_2 și He în proporții bine determinate. Fasciculul obținut are configurație multimodală și se extrage din laser printr-o fereastră din monocristal de clorură de natriu, diametrul fasciculului fiind de 10 mm. Alimentarea cu amestec gazos se realizează din recipiente de gaz, în circuit deschis, recipientii fiind montați în spatele instalației pe suporturi speciali.

Laserul FC 100 se compune din patru subansamble principale (fig.4.3):

- a) bancul optic pe care este montat laserul propriuzis,
- b) panoul de măsură, comandă și control,
- c) dulapul ce cuprinde agregatul de vid și instalația de recirculare a uleiului utilizat la răcirea capului de înaltă tensiune,
- d) dulapul cu instalația electrică,

a) Laserul propriuzis (1)(fig.4.3) este format dintr-un tub de sticlă termorezistentă de tip Pyrex cu pereți dubli avînd respectiv diametrele de 80 și 100 mm. Lungimea totală a tubului este de 3.000 mm, răcirea acestuia asigurîndu-se prin circulația apei de la rețea între cei doi pereți. Tubul este montat pe un suport special avînd la cele două capete cei doi electrozi confecționați din aluminiu și prevăzuți cu pereți dubli pentru a putea fi răciți.

Răcirea capului de înaltă tensiune se realizează cu ulei iar a celui de extracție, cu apă de la rețea. În interiorul celor doi electrozi sînt montate oglinzile laserului. Cavitățile rezonante se compune din două oglinzi executate din placă de cuarț cu grosimea de 10 mm și sînt acoperite cu un strat subțire de aur. Raza de curbura a oglinzilor este $R = 12 \text{ m}$, iar diametrul $\phi = 70 \text{ mm}$. Oglinda de extracție poate fi plană ($R = \infty$) și este prevăzută cu un orificiu de extracție a fascicolului amplasat central, avînd un diametru de 10 mm.

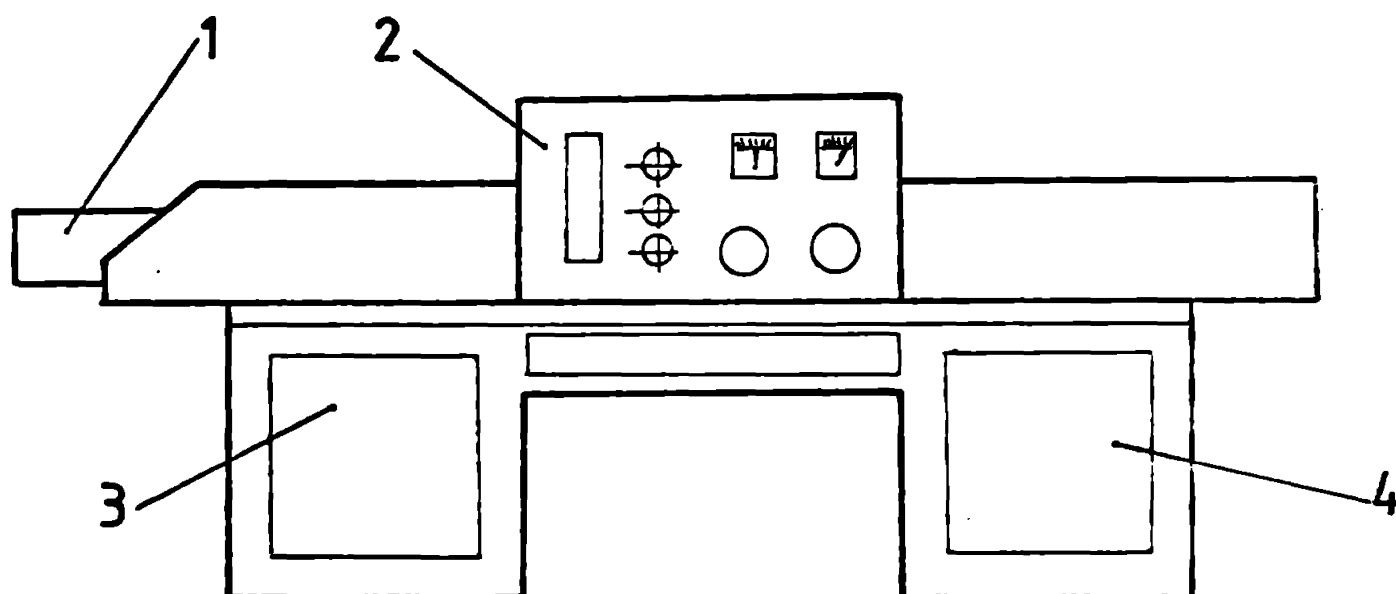


Fig. 4.3 Schema de ansamblu a laserului FC100.

b) Panoul de măsură, comandă și control (2) are montată aparatura necesară controlului principalilor parametri de funcționare a laserului (tensiune, curent, presiunea amestecului) precum și comanda agregatului de vid și a pompei de răcire a capului de înaltă tensiune.

c) Dulapul ce cuprinde agregatul de vid și instalația de recirculare a uleiului de răcire a capului de înaltă tensiune (3), se compune dintr-o pompă de vid cu debitul de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ alimentată de la un motor electric de 0,7 Kw și dintr-o pompă cu roți dințate care antrenează uleiul pentru răcirea capului de înaltă tensiune. Răcirea uleiului se face într-un schimbător de căldură ce funcționează cu apă de la rețea.

d) Dulapul cu instalația electrică (4) cuprinde un transformator de înaltă tensiune (în ulei) de 220-20.000 V, 20 mA; un autotransformator reglabil de 220/0 - 250 V, 18 A; un transformator de

220/24 V, 15 A pentru iluminarea comenzilor tabloului de comandă; releele, contactoarele și siguranțele instalației.

Instalația laser FC 100 (fig.4.4) este, așa cum s-a mai menționat, unul din primele lasere românești (fabricat în 1969) și

Fig.4.4. Instalația laser FC 100

obține un fascicul de secțiune circulară cu un diametru de 10 mm în structură multimod. Fasciculul este emis în plan orizontal, instalația nefiind prevăzută de producător cu sistem de deflexie și focalizare a radiației.

4.1.3. Laserul cu CO₂ monomod LIR 100 (fig.4.5) este un generator de radiații infraroșii ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) coerente, emise continuu în configurația monomod și avînd puterea de pînă la 100 W.

El este un laser închis la care grație unor măsuri tehnologice și constructive rata alterării amestecului gazos este foarte redusă. Aceasta permite o durată de funcționare a laserului de cca 1.000 ore, interval după care, puterea sa scade la jumătate.

Instalația se compune din două subansamble :

- a) laserul propriuzis
- b) sursa de alimentare electrică.

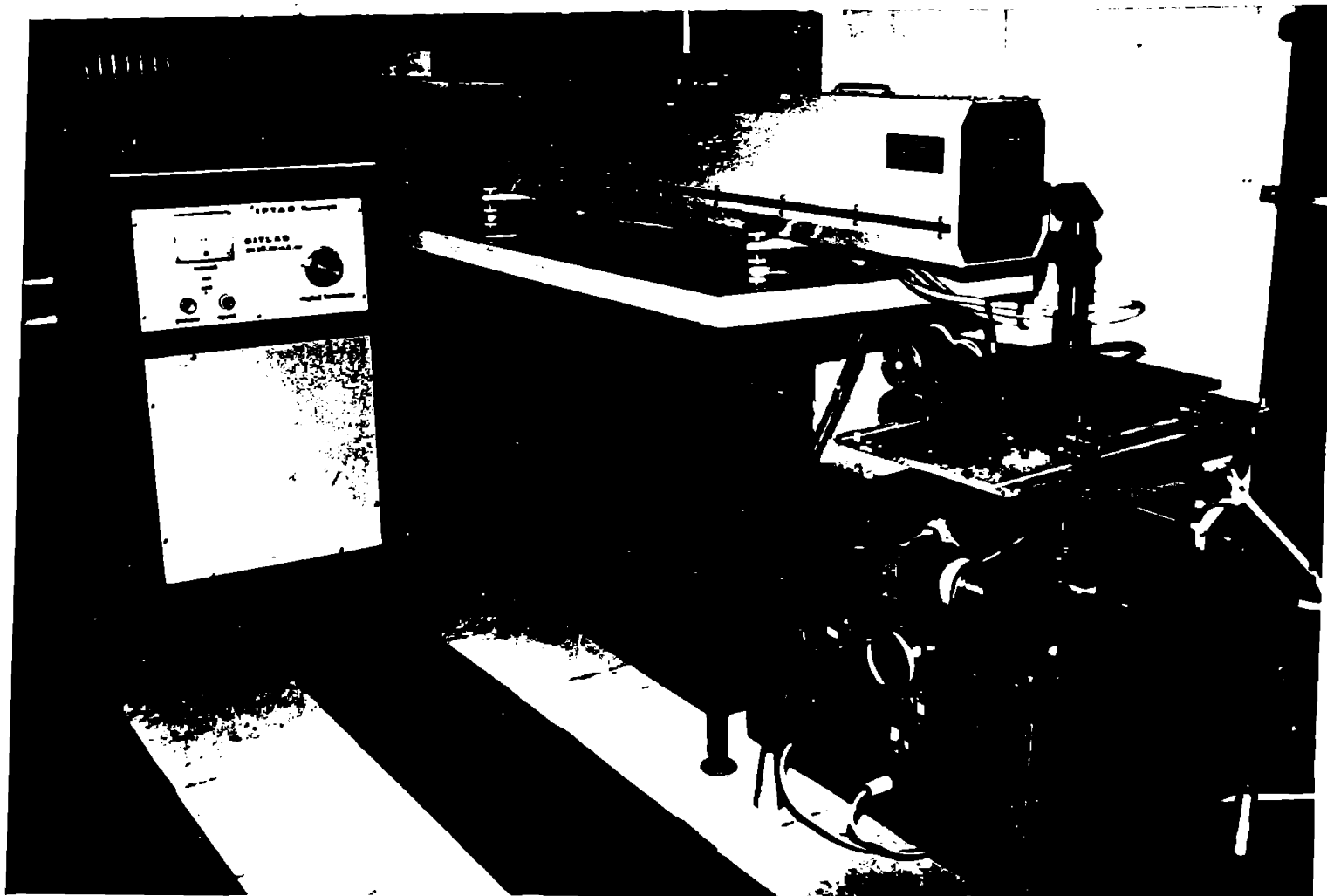


Fig.4.5. Laser închis cu CO_2 de 100 W cu funcționare monomod. LIR 100

a) Laserul propriuzis este format din tubul laser introdus într-o carcasă metalică. Tubul laser este o structură coaxială din trei tuburi de sticlă termorezistentă de tip Pyrex. În tubul interior avînd diametrul de 14,5 mm se află localizați electrozii: la capete, catozii confecționați din tablă de nichel iar la mijloc, un anod confecționat din nichel masiv. Descărcarea electrică formată din două secțiuni apare între catozii marginali și anodul central; în total, lungimea descărcării electrice fiind de 2.200mm. Tubul de descărcare este prelungit în ambele părți cu segmente de tub de diametru 26 mm la capetele cărora se lipesc oglinzile.

Tubul interior este înconjurat de un al doilea tub avînd diametrul de 30 mm, spațiul dintre ele constituind o cămașă de răcire care comunică cu interiorul prin două olive, olive prin care se realizează circulația apei de răcire a cărei presiune minimă trebuie să fie de 2 atm. Acest ansamblu este introdus într-un al treilea tub cu diametrul de 75 mm care se extinde peste cămașă de ieșire și electrozi și se închide pe segmentul majorat astfel în prelungirea tubului central de descărcare. Spațiul interior al acestui ultim tub conține un volum tampon de amestec gazos și

CARACTERISTICILE LASERULUI PROF-RIUZIS	Regim de funcționare	Unda continuă
	Puterea de ieșire laser	100 W
	Lungimea de undă	10,6 μm
	Configurația modală	Monomod TEM ₀₀
	Diametrul fascicolului	(9 ± 1) mm
	Divergența fascicolului	2 × 10 ⁻³ rad.
	Curentul de descărcare	50 mA
	Tensiunea de descărcare	2 × 10 KV
	Randamentul laser	cca. 10 %
	Alimentare electrică	220V; 50Hz; 2,3 KVA
	Alimentare cu apă - presiune - debit	Minim 2 atm. (4 ± 0,5) l/min
	Lungimea descărcării electrice	2200 mm
	Lungimea rezonatorului	2530 mm
CARACTERISTICILE SERPENTINII	Tensiunea de ieșire maximă	2 × 30 KV
	Curentul de ieșire maxim	50 mA
	Dimensiuni de gabarit	1120 × 1120 × 1120 mm
	Masa	100 kg
	Lungimea cordonului de alimentare	10 m
	Legătura la masă prin cordon separat - secțiune minimă - lungime maximă	4 × 16 mm ² 10 m

Tab. 42. LASERUL LIR 100 - CARACTERISTICI

comunică cu tubul central la extremități, prin intermediul unor orificii practicate în secțiunile majorate ale tubului central iar în centru, prin intermediul unei serpentine. Rolul serpentinei este de a împiedica producerea descărcării electrice prin volumul tampon de gaze, prin mărirea drumului. Datorită încălzirii puternice

a catozilor în timpul funcționării laserului și implicit a gazului din tubul central, apare un gradient termic care produce un schimb permanent de gaz între volumul activ și volumul tampon.

Rezonatorul optic este format din două oglinzi lipite la capetele tubului laser. Oglinda de ieșire este din germaniu cu raza $R = \infty$ și are asigurată o transmisie de 27% obținută prin depunere de straturi dielectrice subțiri iar oglinda de capăt este din cuarț acoperită cu aur și are raza $R = 7.000$ mm.

Tubul laser este fixat într-o carcasă prin intermediul unui stativ din dural. Carcasa este prevăzută cu orificiu cu obturator pentru extragerea fasciculului laser.

b) Sursa de alimentare electrică este montată într-un suport deplasabil pe roțile și conține aparatura de control, urmărire și comandă a instalației.

Principalele caracteristici ale instalației sînt prezentate în tab.4.2.

4.1.4. Laserul cu bioxid de carbon cu circulație transversală a amestecului.

S-a văzut că la laserii cu CO_2 cu structură tubulară este necesară răcirea cavității de rezonanță în mod eficient. Acest lucru este necesar deoarece prin descărcare electrică temperatura amestecului gazos crește ceea ce determină o acumulare de populații pe nivelul laser inferior; acumularea este atît de puternică încît la o temperatură de cca $200^{\circ}C$ se anulează inversiunea de populație și deci efectul laser. Acest lucru face ca la aceste tipuri de lasere puterea ce se obține să depindă aproape în exclusivitate de lungimea tubului.

Pentru obținerea puterilor mai mari pe unitatea de lungime, una din soluții este recircularea amestecului activ prin zona descărcării.

La laserul cu circulație transversală acest lucru este realizat cu ajutorul unui ventilator centrifugal de mare capacitate ce asigură o circulație a amestecului cu o viteză de cca 40 m/s. La această viteză timpul în care gazul rămîne în zona descărcării electrice este de ordinul milisecundelor, timp ce este mai mic decît timpul caracteristici ai proceselor de transfer a energiei de vibrație în energie de translație (căldură). Instalația laser cu recircularea amestecului se compune din următoarele tronsoane (fig.4.6) :

a) cutia laser - în care se găsesc electrozii pentru realizarea descărcării și oglinzile rezonatorului optic cu dispozitivele de aliniere ;

b) tronsonul ventilatorului - conține un ventilator centrifugal realizat pe baza modelului V27S;

c) tronsonul de răcire conține un radiator de autoturism prin care circulă apă de răcire de la rețea, răcirea amestecului gazos realizându-se prin circulația forțată a acestuia printre alveolele radiatorului;

d) tronsoanele de legătură, în număr de trei, sînt prevăzute cu pereți dubli printre care circulă apa de răcire, asigurându-se astfel o răcire suplimentară a amestecului;

e) cavitatea rezonantă se compune din două oglinzi aflate la distanța de 1040 mm. Oglinda de capăt este confecționată din oțel inoxidabil și este depusă sub vid cu un strat de aur, iar oglinda de cuplaj este confecționată din germaniu, și este acoperită antireflex. În interiorul cavității rezonante sînt montați electrozii, atât anodul cît și catodii sînt răciți cu apă;

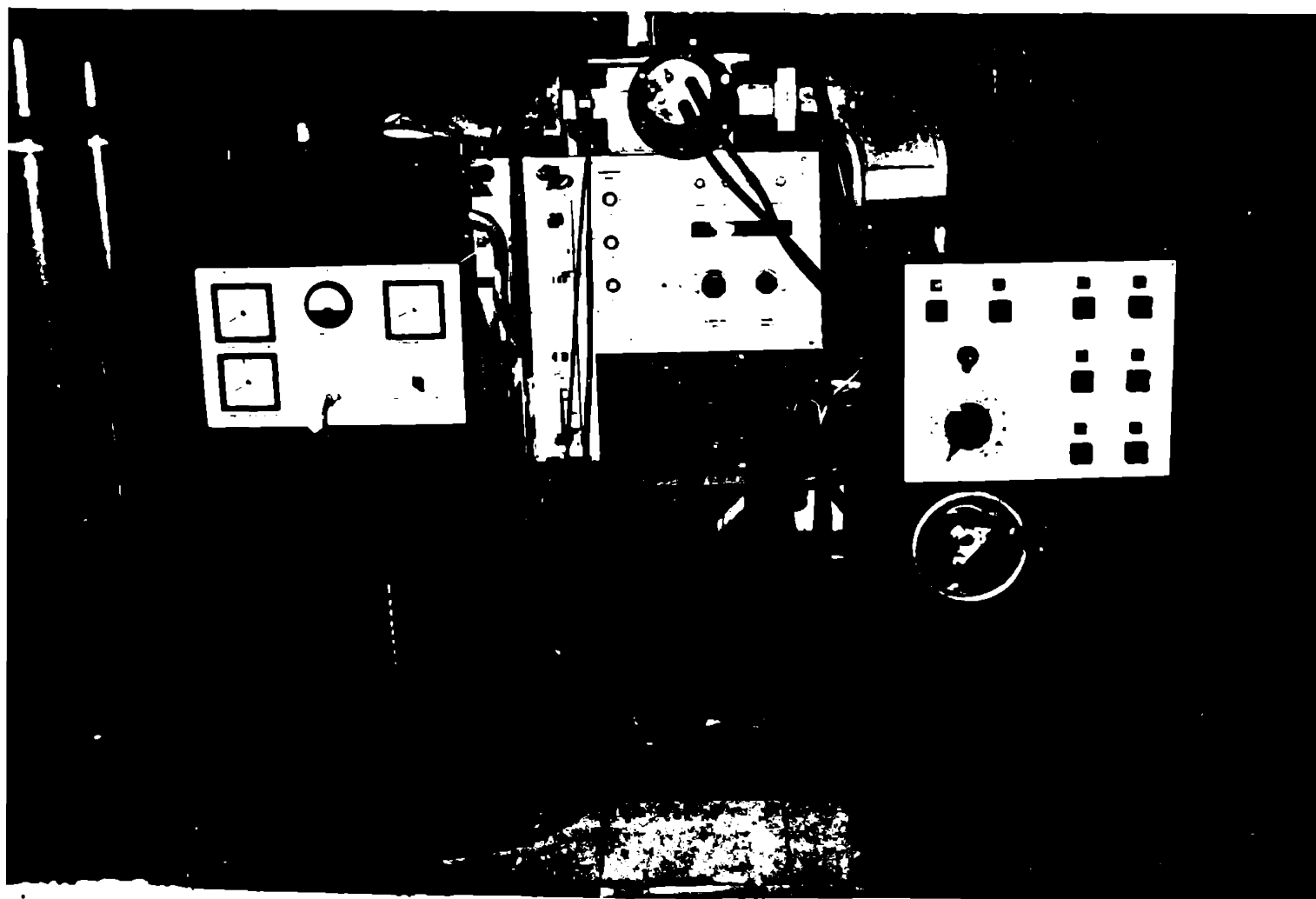


Fig.4.6. Laserul cu CO₂ cu circulație transversală

f) panourile pentru controlul, urmărirea și comanda instalației sînt amplasate pe batiul laserului și respectiv pe peretele vertical al dulapului constituit drept alimentator al laserului. Principalele caracteristici ale instalației sînt prezentate în tab.4.3.

LASERUL CU CO ₂ CU CIRCULAȚIE TRANSVERSALA A AMESTECULUI - CARACTERISTICI -			
FUNCTIONALE	Lungimea de undă	10,6 μm (infraroșu îndepărtat)	
	Puterea	min. 400 W	
	Structura modală	Multimod	
	Diametrul fascicolului	max. 40 mm	
	Polarizare	Nepolarizat	
TEHNICE	Dimensiuni	1644 x 1200 x 1600	
	Masă	450 kg	
	Antrenarea gazului	Ventilator centrifugal Capacitate 11.000 m ³ /h	
	Viteza de curgere a gazului	≤ 40 m/s	
	Rezonatorul	Oglinda inox+ cupru	R=99%
		Oglinda germaniu 30% transmisie	R=99% T=30%
	Electrozii	anod	Teava de cupru
		catod	Structura cu 35 electrozi
	Alimentarea cu gaze	Din butelii de microm pe 200 kg	
	Alimentarea cu apă	presiune	2 atm
		debit	10 l/h
	Alimentarea electrică	Trifazie 3 x 380V	

Tab. 4.3 LASERUL CU CIRCULAȚIE TRANSVERSALA - CARACTERISTICI

4.2. Contribuții la proiectarea și construcția unor dispozitive necesare echipării instalațiilor laser utilizate

În vederea utilizării emisiei laserilor cu CO_2 a fost necesară echiparea acestora cu sisteme de deflexie și focalizare a radiației precum și cu mese port obiect.

Instalațiile utilizate fiind, în general, modele experimentale s-a impus proiectarea unor dispozitive cu grad ridicat de universalitate, dispozitive care să asigure o gamă largă de viteze de deplasare, astfel încât să fie posibilă atât prelucrarea materialelor metalice cât și a nemetalelor.

Focalizarea fascicului laser este realizată, în soluțiile adoptate, cu ajutorul lentilelor cu mărimi diferite ale distanțelor de focalizare, lentile confecționate din materiale cu transmisie ridicată în infraroșu îndepărtat.

4.2.1. Unele aspecte privind proiectarea dispozitivelor de prelucrare cu laser asistat de jet de gaz.

Utilizările recomandate de constructor pentru instalațiile laser pe care s-au făcut experimentările se referă îndeosebi (pentru laserii cu bioxid de carbon) la procesele de debitare, tăieri de fonte, fracturare controlată și sudare. În afara sudării, celelalte operații de prelucrare se desfășoară preferențial în prezența unui jet de gaz ajutător, gaz care se aduce la locul de prelucrare la o presiune corespunzătoare, de regulă, coaxial cu fascicului laser. Rolul gazului ajutător este multiplu. Astfel, în procesul de tăiere gazul ajutător :

- contribuie în mod substanțial la îmbunătățirea calității tăieturii, aceasta rezultând cu margini drepte și bine definite;
- protejează lentila de focalizare împotriva produselor de ardere și a stropilor de metal topit, mărinđ astfel viața lentilei;
- transportă energia de la suprafața tăieturii în profunzimea materialului mărinđ astfel penetrația;
- contribuie la expulzarea materialului topit ce s-ar condensa altfel pe pereții tăieturii;
- are un efect de răcire a marginilor tăieturii ceea ce permite tăierea materialelor ușor inflamabile fără pericol de ardere a margini-

- răcește lentila de focalizare dacă aceasta vine în contact cu jetul de gaz;
- la folosirea oxigenului, acesta furnizează energia de oxidare sporind productivitatea procedurii de cca 3 ori.

La stabilirea dimensiunilor dispozitivului de focalizare un rol esențial îl are lentila de focalizare utilizată. Alegerea lentilei de focalizare prin distanța focală și apertura acesteia determină implicit dimensiunile dispozitivului de focalizare.

De asemenea, un rol deosebit de important în procesul de tăiere cu laser asistat de jet de gaz îl are duza de suflare a gazului (prin forma și dimensiunile acesteia).

4.2.1.1. Alegerea lentilei de focalizare

Pentru focalizarea radiației laserului cu dioxid de carbon ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) se utilizează lentile confecționate din materiale care asigură o transmisie ridicată la lungimea de undă a acestor radiații (tab.4.4)

Material	Indicele de refracție	Reflectivitatea Fresnel	Reflectivitate Fabry-Perot	Absorbție	Higroscopic
NaCl cristal	1,490	0,039	0,415	0,015	da
KCl cristal	1,454	0,034	0,127	0,015	da
Bc ₂ F cristal	1,420	0,030	0,113	0,015	puțin
KRS 5	2,380	0,167	0,490	0,015	puțin
Irtran 2	2,190	0,139	0,429	0,015	nu
Irtran 4	2,400	0,170	0,497	0,015	nu
Germaniu	4,000	0,360	0,779	0,015	nu

Tab 4.4. MATERIALE UTILIZATE LA CONFECTIONAREA LENTILELOR DE FOCALIZARE PENTRU RADIATIE LASER CU $\lambda=10,6 \mu\text{m}$

În general, pentru focalizare se utilizează lentile sferice subțiri, care au grosimea (d) mai mică decât distanța focală (f). (fig.4.7a) Formele utilizate pentru aceste lentile sînt prezentate în fig.4.7.

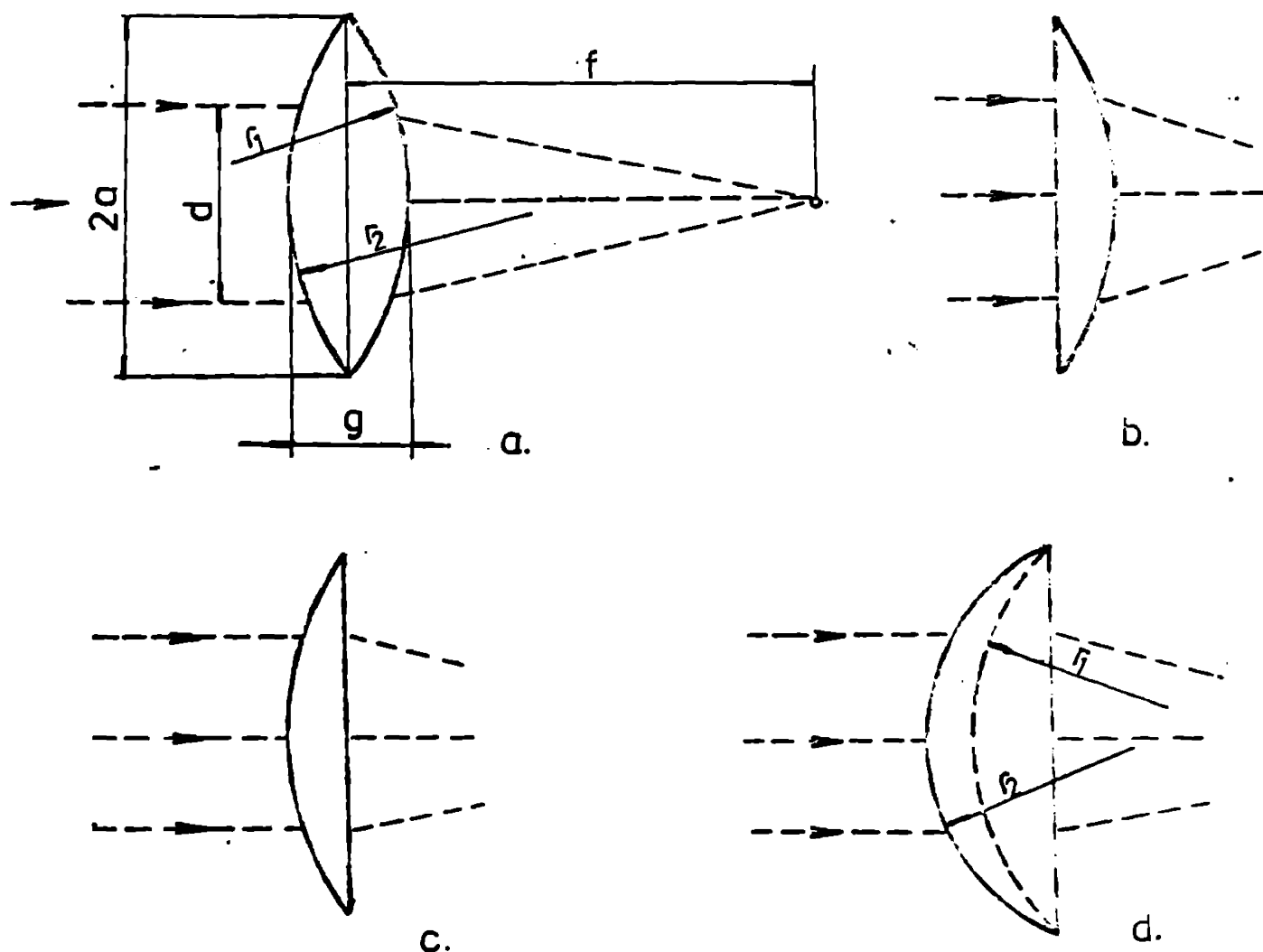


Fig. 4.7. Forma lentilei de focalizare: a) dublu-convexă, b) plan-convexă, c) convex-plană, d) convex-concavă.

Indiferent de forma lentilei, puterea obținută în focarul acesteia este dată de relația /60/:

$$P_f = P_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{2a}{d}\right)^2} \right] \quad (4.1)$$

în care: P_0 - puterea totală a laserului;
 a - raza lentilei de focalizare (Fig. 4.7);
 d - diametrul fascicului laser.

Din relația (4.1) se deduce că la focalizarea radiației laser puterea obținută în focar depinde de raportul $\frac{d}{2a}$. Astfel :

pentru; $\frac{d}{2a} < \frac{1}{3}$ (adică diametrul fascicului laser "umple" deschiderea lentilei pe maximum o treime) puterea obținută în focar este de 99,99% din puterea laserului;

iar pentru $\frac{d}{2a} > \frac{1}{3}$ puterea în focar scade, ceea ce impune ca

la focalizare să se țină seama de fenomenul de difracție. Pentru a se putea neglija difracția în procesul de focalizare, se impune ca diametrul lentilei să fie cel puțin egal cu de trei ori diametrul fascicului incident ($2a \geq 3d$).

Un alt factor care trebuie luat în considerare la alegerea lentilei este aberația sferică a acesteia, aberație care permite determinarea raportului optim dintre diametrul fascicului și distanța focală a lentilei, influențând în același timp adâncimea focarului, intensitatea maximă ce se poate obține cât și diametrul minim al petei focale.

Aberația sferică a lentilei depinde în mod determinant de forma acesteia. Dacă considerăm funcția de aberație pentru situația $2a = 3d$:

$$\phi = G_i \cdot \frac{a^4}{f^3} \quad (4.2)$$

în care: G_i este funcția indicelui de refracție n al lentilei, din relațiile :

$$G_1 = -\frac{1}{32} \left[\frac{4n}{n-1} + \frac{2-n}{n(n-1)^2} \right] \quad (4.3)$$

$$G_2 = -\frac{1}{8} \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \quad (4.4)$$

$$G_3 = -\frac{1}{8} \left[1 + \frac{2-n}{n(n-1)^2} \right] \quad (4.5)$$

$$G_4 = -\frac{1}{32} \left[\frac{n^2}{(n-1)^2} - \frac{n}{n+2} \right] \quad (4.6)$$

care exprimă valoarea acestui indice corespunzător formelor lentilelor prezentate în fig.4.7, se observă că aberație sferică minimă se obține pentru lentilele de forma celor prezentate în fig.4.7 d.

Pentru aceste lentile se pot determina și razele de curbura astfel ca să se obțină o aberație sferică minimă :

$$r_1 = \frac{f}{\frac{1}{2(n-1)} - \frac{n+1}{n+2}} \quad ; \quad r_2 = \frac{f}{\frac{1}{2(n-1)} + \frac{n+1}{n+2}} \quad (4.7)$$

De asemenea, pentru a avea lentile cu aberație sferică minimă se recomandă utilizarea în confecționarea acestora a unor materiale cu indice de refracție cât mai mare.

Pentru alegerea lentilei de focalizare din considerente determinate de obținerea unei aberații sferice minime se procedează în felul următor :

- se calculează parametrul aberației sferice, parametru ce arată cât este de mare funcția de aberație în unități de lungime de undă a radiației ce străbate lentila:

$$m = \frac{f}{\lambda} G_i \left(\frac{3d}{2f} \right)^4 \quad (4.8)$$

- pentru obținerea densității de putere maximă se determină :

$$m_0 = 8,1 \cdot 10^{-3} \frac{f}{\lambda} G_i \quad (4.9)$$

- se calculează iluminarea optimă a lentilei :

$$\left(\frac{d}{2f} \right)_{opt} = \frac{1}{4} \sqrt[4]{\frac{9}{m_0}} \quad (4.10)$$

determinându-se în acest fel diametrul optim al fasciculului sau distanța focală optimă a lentilei.

Se pot calcula de asemenea :

- intensitatea maximă a fasciculului :

$$I_{max} = 0,1687 \frac{P_0}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{m_0}} \quad (4.11)$$

- domeniul de profunzime :

$$\Delta z = 15,7 \lambda \cdot \sqrt{m_0} \quad (4.12)$$

- diametrele fasciculului la limita domeniului de profunzime :

$$\begin{aligned} D_0 &= 2,48 \lambda \sqrt[4]{m_0} \\ D_1 &= 1,17 D_0 \\ D_2 &= 0,9 D_0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Utilizînd relația (4.11) pentru calculul intensității maxime ce se obține în focarul lentilei cu aberație sferică se obține o diferență de aproape un ordin de mărime față de intensitatea calculată în aceleași condiții dar cu o lentilă fără aberații. Astfel: la focalizarea unei radiații laser monomod de 100 W cu o lentilă din germaniu ($n=4$) avînd distanța focală $f=50$ mm; și forma prezentată în (fig.4.7d) se obține, utilizînd relațiile (4.6, 4.9, 4.10 și 4.11) o intensitate maximă a radiației $I_{\max}=1,30 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$. În aceleași condiții, utilizînd o relație similară care nu ține cont de aberația sferică a lentilei /78/ obținem : $I_{\max}=8,3 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$

Diferența apreciabilă între cele două rezultate derivă și de la considerarea unor condiții de optim diferite.

Dacă în baza relațiilor considerate, intensitatea maximă ce se poate obține în focar apare pentru cazul $2a=1,76 d$, relația de calcul din literatura /78/ consideră drept condiție de optim de focalizare cazul $2a \approx 1,07 d$.

Deoarece "adîncimea focarului" ($Z_f = \pm \frac{\lambda f^2}{\pi \cdot \omega^2}$ - pentru fasciculul focalizat TEM_{00} /78/) depinde de mărimea distanței focale a lentilei, alegerea distanței focale se face și în funcție de grosimea materialului ce urmează a fi supus prelucrării.

Astfel, pentru tăierea tablelor de grosimi mari se recomandă utilizarea lentilelor cu distanță focală mare ($f \geq 300$ mm) iar pentru materiale subțiri lentile cu distanță focală mică.

Polosirea distanțelor focale mai reduse nu se recomandă din cauza unei distanțe prea mici de la lentilă la locul de prelucrare (ceea ce determină o distrugere termică mai rapidă a acestora) și a unei aberații sferice prea mari.

Pentru alegerea lentilei de focalizare se vor avea în vedere următoarele recomandări :

- pentru neglijarea efectului de difracție se vor alege lentile cu apertură mare ($2a \gg 3d$) în raport cu diametrul fasciculului;
- pentru limitarea influențelor aberației sferice se recomandă utilizarea lentilelor de formă convex-concavă (fig.4.7d) cu razele de curbură calculate după relațiile 4.7 ;
- la focalizarea radiației laserului cu CO_2 ($\lambda = 10,6\mu\text{m}$) se vor utiliza lentile de focalizare cu indice de refracție cât mai mare;
- distanța focală a lentilei de focalizare se alege în funcție de grosimea materialului supus prelucrării precum și de precizia impusă prelucrării.

4.2.1.2. Alegerea formei și dimensiunilor duzei de suflare a gazului ajutător

La prelucrarea cu laser asistat de jet de gaz, gazul ajutător este trimis printr-un ajutaj (duză) coaxial cu axa optică a lentilei de focalizare și deci a fasciculului laser.

Pentru asigurarea unei folosiri eficiente a gazului ajutător s-a analizat influența formei și dimensiunilor duzei asupra condițiilor de curgere a acestuia.

Debitul de gaz ce se scurge printr-o duză convergentă de diametru d de la presiunea p_0 la presiunea p este dat de relația:

$$G = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \psi}{4} \sqrt{2 \frac{p_0}{V_0}} \quad (4.14)$$

în care: p_0, V_0 mărimile de stare inițiale ale gazului;

ψ - coeficient adimensional calculat cu relația :

$$\psi = \left\{ \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ - exponentul adiabatic.

Se observă din relația (4.14) că debitul de gaz depinde doar de diametrul duzei d și de coeficientul adimensional ψ .

Reprezentarea grafică a relației (4.15) $\psi \left(\frac{p}{p_0} \right)$ ne relevă existența unui maxim al acestui coeficient de valoare :

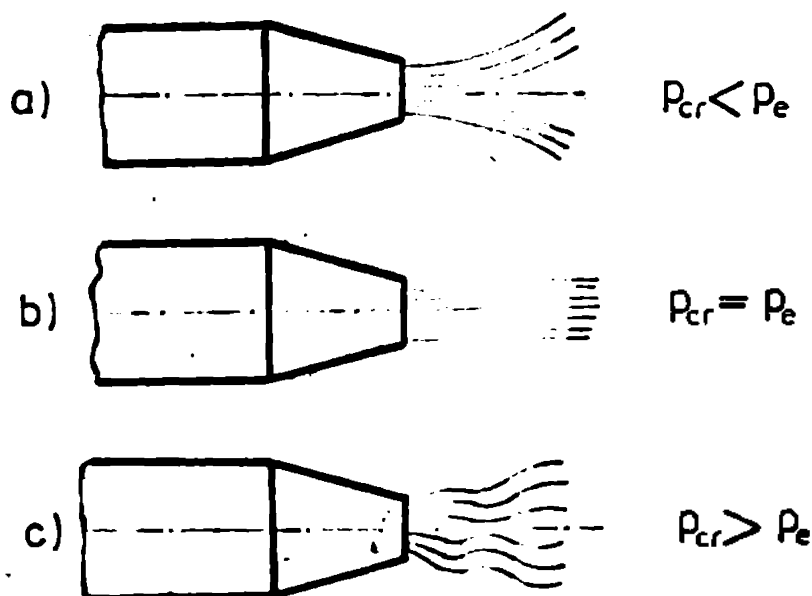
$$\psi_{\max} = \left(\frac{2}{\gamma_c + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma_c - 1}} \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_c + 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

Această valoare a lui ψ corespunde unei valori de presiune denumită presiune critică :

$$p_{cr} = p_0 \left(\frac{2}{\gamma_c + 1} \right)^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}} \quad (4.17)$$

Dacă se notează cu p_e presiunea mediului în care debușează gazul din ajutoraj, pot apare următoarele situații distincte (fig.4.8)

- $p_e > p_{cr}$: în ajutoraj gazul nu va atinge viteza critică și deci nu se va atinge randamentul maxim al ajutorajului (fig.4.8a);
- $p_e = p_{cr}$: se obține un curent laminar de gaz, (fig.4.8b) o vină de secțiune constantă pe un anumit parcurs după care acesta difuzează în mediul înconjurător;
- $p_e < p_{cr}$: gazul părăsește ajutorajul cu ψ_{\max} deci se des-



tinde în el pînă la p_{cr} iar în exterior se des-tinde în con-tinuare, în mod pulsator pînă la atin-gerea presiu-nii p_e (fig. 4.8c).

Valorii lui ψ_{\max} îi co- respunde o vi- teză de curge- re a gazului

Fig. 4.8. Curgerea gazelor prin duze convergente

critică dată de relația :

$$v_{cr} = \sqrt{2 \frac{\gamma_c}{\gamma_c + 1} R \cdot T_0} \quad (4.18)$$

în care: R - constanta gazelor.

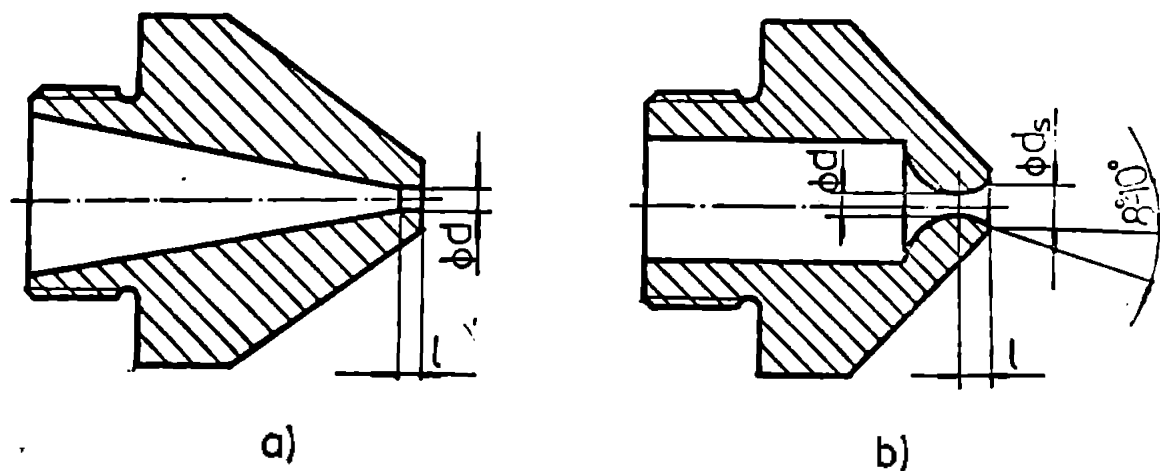


Fig.4.9. Duzes pentru suflarea gazului ajutator.
a) convergentă; b) convergent-divergentă

Pentru cazul în care $p_e < p_{cr}$ căderea de presiune suplimentară poate fi utilizată prin adăugarea la ajutajul convergent a unei zone divergente (ajutaj Laval).

Duzele convergent-divergente (fig.4.9 b) se caracterizează printr-o parte convergentă foarte scurtă, dar bine rotunjită și o parte divergentă avînd unghiul de divergență cuprins între 3° și 10° pentru a evita desprinderea curentului de gaz de pe pereții acesteia.

Relația (4.18) este valabilă pentru cazul curgerii gazului dintr-un rezervor în care mărimile de stare ale gazului sînt constante. În situația în care gazul ajunge la ajutaj cu o viteză oarecare și pentru a îngloba diferențele ce apar față de cazul ideal (frecări, cunoașterea mărimilor de stare ale gazelor în conducte etc), viteza critică se calculează cu relația:

$$v_{cr} = \varphi \left\{ 2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_0 V_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

în care: φ - coeficient de viteză ($\varphi < 1$).

Pentru dimensionarea duzelor de suflare a gazului se consideră cazul cel mai avantajos procesului de prelucrare la care se utilizează, și anume $p_e \leq p_{cr}$. Considerînd toate mărimile la valoarea critică, diametrul duzei de suflare a gazului se poate determina cu relația:

$$d = \left[\frac{G}{\mu \cdot \lambda \cdot B \cdot \Theta (p_K + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ [mm]} \quad (4.20)$$

în care :

- G - debitul de gaz (m^3/h),
- μ - coeficient de curgere
- B - coeficient ce ține seama de natura gazului ajutător,
- θ - coeficient de temperatură : $\theta = \frac{293}{T_1}$; $T_1(K)$ este temperatura gazului la ieșirea din ajutaj. (se dă tabelar în literatură),
- P_K - presiunea gazului înaintea intrării în ajutaj,
- λ - coeficient adimensional calculat cu relația :

$$\lambda = \left(\frac{x+1}{2} \right)^{\frac{1}{1-x}} \left[\frac{x+1}{x-1} j^{-\frac{2}{x}} - 1 - j^{-\frac{x-1}{x}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

pentru : $j = \frac{P_K}{P_e}$ și x calculat.

Pentru utilizarea în procesul de tăiere a oxigenului relația 4.20 pentru calculul diametrului minim al duzei devine /67/ :

$$d = 1,43 = \left(\frac{G}{P_{K+1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

În cazul duzele de tip de Laval diametrul maxim al zonei conice la ieșirea din ajutaj, pentru atingerea vitezei sonice de curgere a gazului, este :

$$d_K = 0,5087 \cdot d \left[\frac{1}{(P_{K+1})^{1,428}} - \frac{1}{(P_0+1)^{1,713}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.23)$$

În procesul de tăiere cu laser asistat de jet de gaz rolul determinant al gazului asupra calității tăieturii se manifestă în primul rând prin viteza de curgere și prin forma jetului de gaz.

Un curent laminar de o mare energie cinetică determină o tăietură curată, cu zgură puțină și creștături cu amplitudine foarte redusă.

În baza relației (4.23) s-au dimensionat, realizat și încercat un număr de 7 ajutaje convergente și 7 ajutaje convergent-divergente (tab.4.5)

Nr. crt.		1	2	3	4	5	6	7
	G [l/h]	300	450	600	750	900	1050	1200
Ajutaj convergent	d [mm]	0,4	0,5	0,57	0,65	0,7	0,8	1,0
	l [mm]	1,0	1,4	2,2	2,8	3,0	3,2	3,5
Ajutaj de Laval	d [mm]	0,4	0,5	0,57	0,62	0,7	0,8	1,0
	ds [mm]	0,43	0,55	0,62	0,68	0,77	0,88	1,1
	l [mm]	2,5	2,8	3,0	3,1	3,4	3,6	4,0

Fig. 4.5. AJUTAJE CONVERGENTE SI CONVERGENT DIVERGENTE

Valorile calculate în Tab.4.5 căorespund unei presiuni de intrare a gazului în ajutaj de 3 atm. Incercările efectuate asupra acestor duze au reliefat necesitatea exploatării acestora la valori ale parametrilor de curgere a gazului cât mai aproape de valorile critice determinate analitic.

Realizarea unui curent de gaz laminar, determină o tăietură de lățime redusă și deosebit de uniformă (dacă, evident, sînt corelați și ceilalți parametri ai regimului de tăiere).

4.2.2. Dispozitiv de tăiere cu laser asistat de jet de gaz pentru instalația FC 100

Dispozitivul proiectat și realizat în vederea echipării instalației laser FC 100 s-a conceput astfel încît să fie solidarizat cu capul laserului în zona de extracție a fasciculului. Acest lucru s-a realizat prin adaptarea corespunzătoare a formei corpului dispozitivului (fig.4.10).

El se compune din două subansamble principale :

a) subansamblul de deviere și focalizare a fasciculului laser,

b) masa port obiect a dispozitivului.

a) Subansamblul de deviere și focalizare a fasciculului laser:

realizează deflexia fasciculului din plan orizontal în plan vertical, focalizarea acestuia, asigurînd în același timp posibilitatea trimiterii unui jet de gaz ajutător, coaxial cu fasciculul, asupra piesei supuse prelucrării.

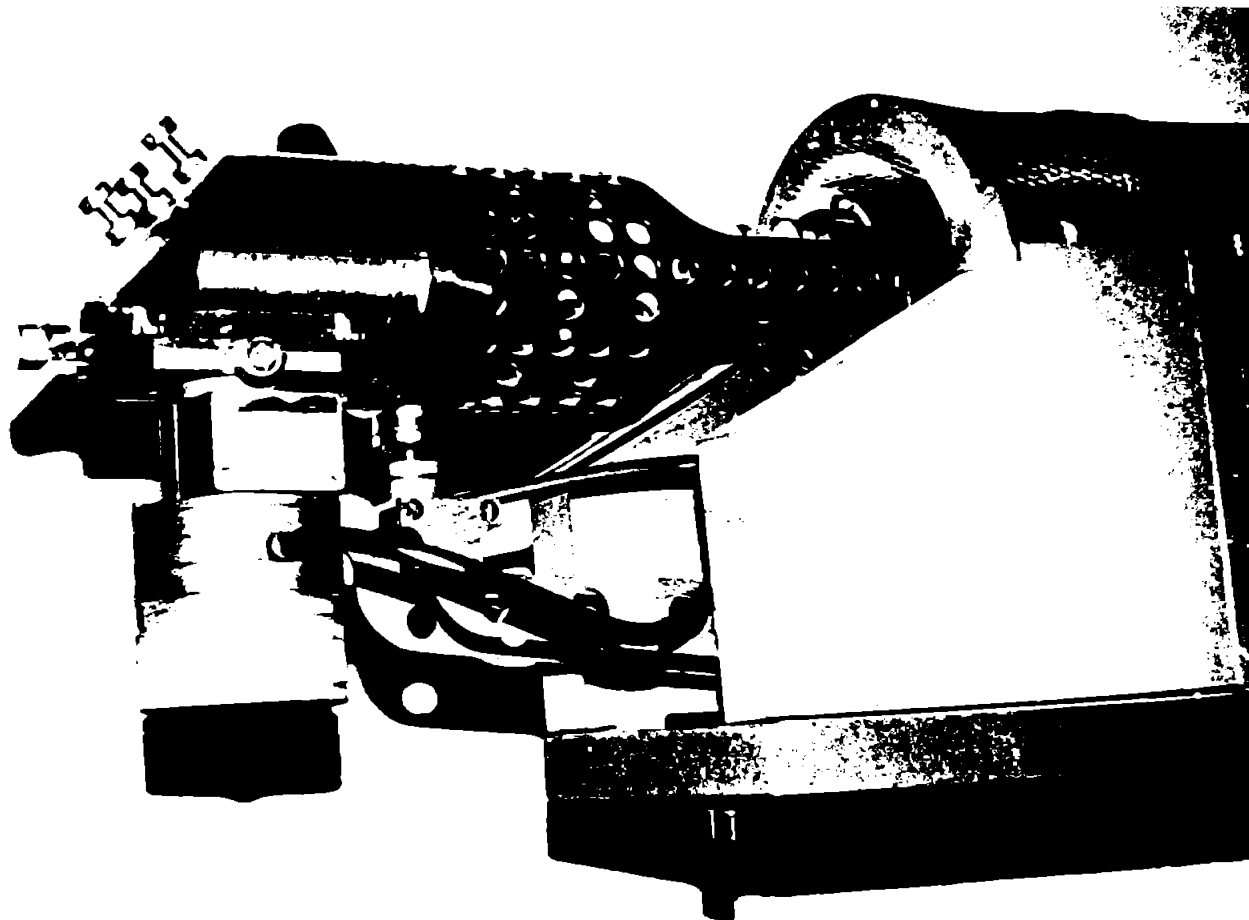


Fig.4.10. Dispozitiv destinat prelucrării materialelor pe instalația laser FC 100

Devierea în plan vertical a radiației laser se obține cu ajutorul unei oglinzi plane confecționată din cuarț și acoperită cu o peliculă fină de aur, depusă în vid pe suprafața activă a oglinzii. Pentru asigurarea coaxialității între axa fasciculului și axa duzei de suflare a gazului, oglinda este montată într-un suport reglabil prevăzut cu o articulație sferică și șuruburi de reglare cu pas fin. În același scop, corpul lentilei este montat pe un suport ce permite deplasări în plan orizontal după două axe perpendiculare, deplasări asigurate cu mecanisme șurub piuliță. Dispozitivul permite montarea unor lentile de focalizare cu distanța focală cuprinsă între 30 și 100 mm, schimbând în mod corespunzător și duza de suflare a gazului. Pentru încercările efectuate s-a folosit o lentilă de diametru 60 mm cu o distanță focală de 50 mm, confecționată din germaniu. Deși absorbția radiației infraroșii de $10,6 \mu\text{m}$ este redusă în germaniu există totuși pericolul încălzirii acesteia la durată mai mare de utilizare. În plus, datorită depunerilor de impurități din mediul înconjurător (praf, vapori de material prelevat etc), gradul de transmisie al lentilei se reduce treptat ceea ce mărește pericolul distrugerii termice a acesteia

Un rol deosebit în protecția lentilei îl are gazul ajutător utilizat în procesul de tăiere, gaz care, pe lângă o răcire a lentilei, antrenează vaporii de material prelevat evacuuându-i de la locul de interacțiune și ferește astfel lentila de depunerile care îi grăbesc "îmbătrânirea".

Pentru protecția suplimentară a acestor lentile, relativ costisitoare, se impune o răcire suplimentară, răcire care este asigurată atât prin răcirea corpului dispozitivului cât și prin suflarea unui jet de aer comprimat pe suprafața superioară a lentilei (fig.4.11)

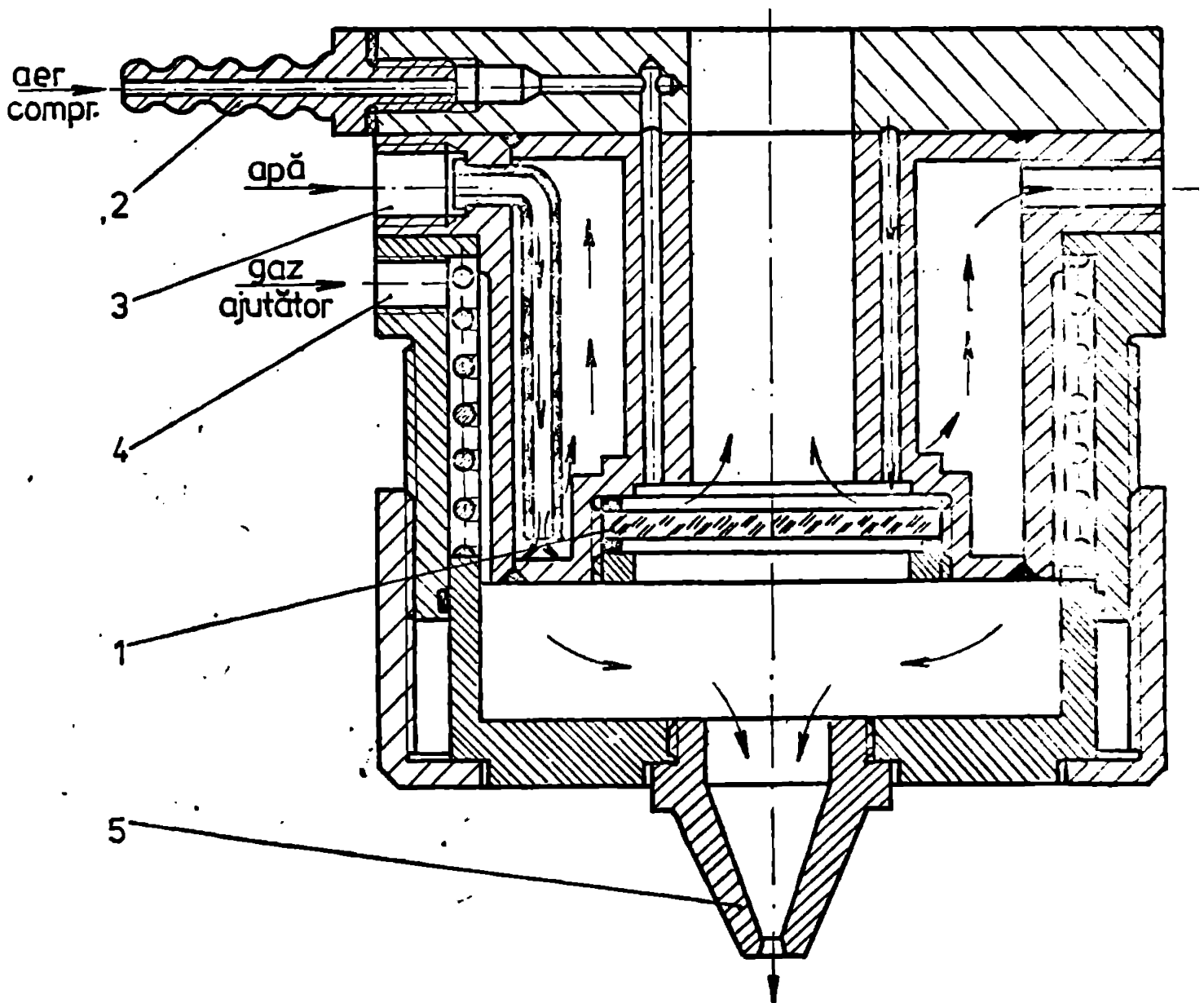


Fig. 4.11. Sistem portlentilă pentru dispozitivul de focalizare al laserului FC-100.

Aerul comprimat de la rețea introdus în corpul dispozitivului prin olivă 2, este suflat asupra lentilei 1 (fig.4.11) printr-un număr de 12 orificii echidistante. Răcirea corpului portlentilă se asigură prin circulația apei de la rețea, apă ce se introduce printr-o altă olivă montată în orificiul 3 al corpului. Gazul ajutător (oxigen, aer comprimat, azot etc) utilizat în procesul de tăiere este introdus prin orificiul 4 al dispozitivului și se trimite asupra piesei supuse prelucrării prin duza de configurație specială 5.

Dispozitivul mai este prevăzut cu un obturator al fasciculului amplasat în fața lentilei de focalizare și destinat protecției la supraîncălzire a acesteia atunci când nu se lucrează.

b) Masa port-obiect a dispozitivului asigură posibilitatea poziționării corespunzătoare a materialului supus prelucrării în focarul obiectivului cât și posibilitatea deplasării acestuia în fața fasciculului. Mișcarea verticală, de poziționare a mesei, se asigură manual printr-un angrenaj melcat. Mișcarea de deplasare transversală a mesei se asigură prin intermediul unui motor electric de c.c. alimentat de la rețea printr-un autotransformator, a unui reductor melcat și a unui mecanism șurub piuliță.

Acționarea transversală este echipată cu un cuplaj ce permite fie cuplare manuală (necesară la poziționare) fie mecanică (în vederea prelucrării). Platoul pe care se fixează piesa supusă prelucrării este de formă circulară și poate fi antrenat în mișcare de rotație (manuală sau mecanică) printr-un mecanism melcroata melcată cu viteze de până la 18 m/min.

Viteza de deplasare transversală a mesei este reglabilă continuu în intervalul 0 - 120 mm/min, prinderea probei pe masă asigurându-se fie în menghină fie în dispozitive speciale de prindere.

4.2.3. Dispozitiv pentru tăiere, sudare și tratament termic destinat instalației laser cu circulație transversală

Acest dispozitiv a fost proiectat și executat în vederea echipării laserului cu CO₂ cu circulație transversală, model experimental, produs de IFTAR București.

Datorită puterii ridicate a acestei instalații și a posibilităților mai largi de folosire dispozitivul s-a conceput

astfel încât să poată fi utilizat pentru o gamă foarte largă de experimentări.

În vederea controlului în orice moment al puterii radiației laser s-a introdus în construcția dispozitivului o capsulă radio-metrică deplasabilă, protejată în amonte cu un obturator de fascicul care să permită manevrarea acesteia.

Dispozitivul se compune din două subansamble principale (fig.4.12) :

- a) subansamblul de dirijare și focalizare a radiației laser,
- b) subansamblul masă port obiect prevăzut și cu panou de comandă și control.

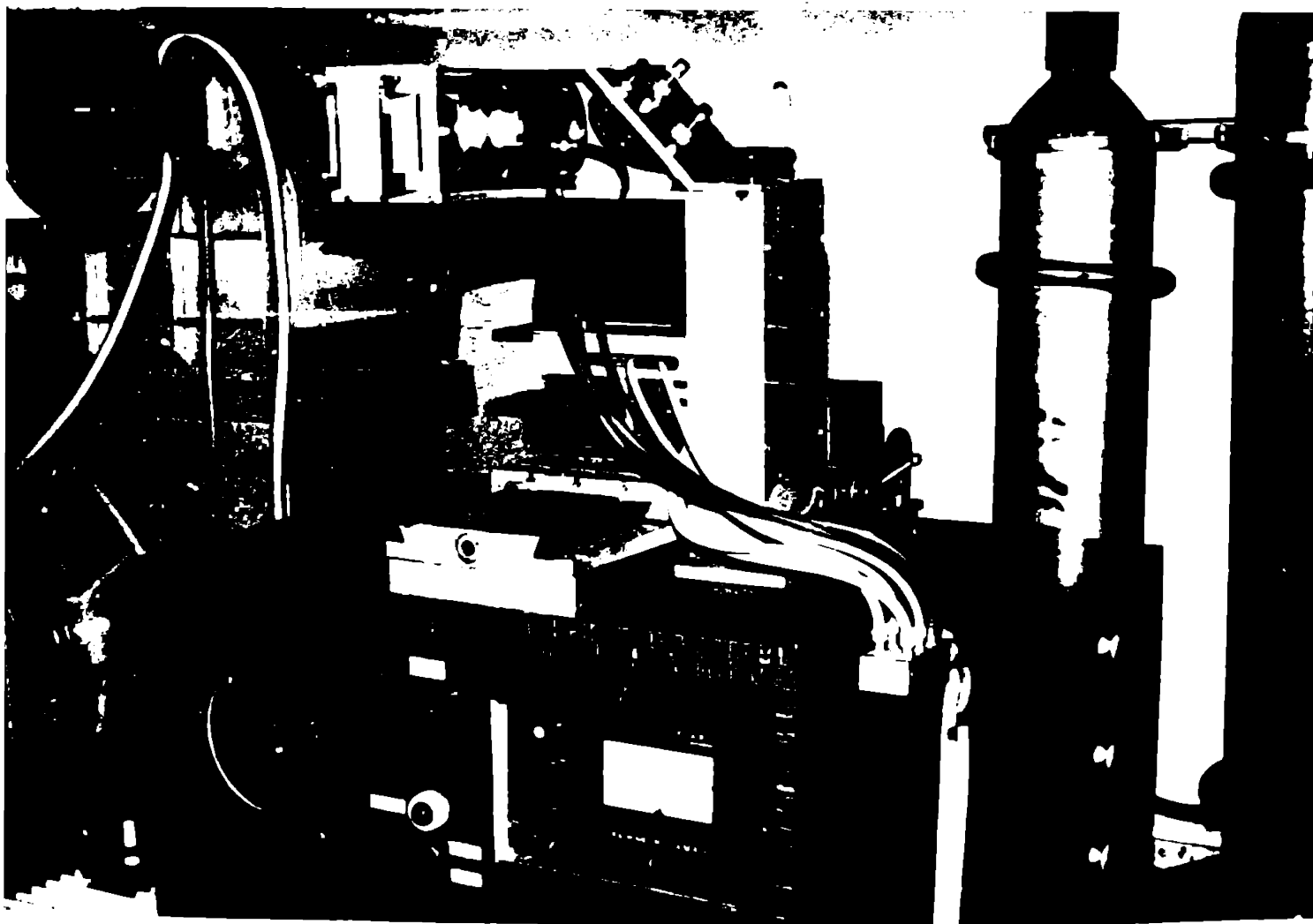


Fig.4.12. Dispozitiv pentru prelucrarea mat. pe instalație laser cu circulație transversală.

a) Subansamblul de dirijare și focalizare a radiației laser.

Rolul acestui subansamblu este de a devia și focaliza fasciculul laser.

Devierea fasciculului în plan vertical se realizează cu ajutorul unei oglinzi plane confecționată din cuarț sau din oțel inoxidabil având pe suprafața activă, după sub vid, un strat de aur.

Reglarea poziției corespunzătoare a oglinzii se poate efectua printr-o articulație sferică și trei șuruburi cu pas fin prevăzute cu contrapiulițe.

Dispozitivul are înglobat o capsulă radiometrică ce poate fi deplasată cu ajutorul unei manete. Radiometrul propriuzis este montat în subansamblul mesei port-obiect și permite controlul puterii în limitele 0,5 - 1000 W, fiind prevăzut cu 3 trepte de măsurare (100, 300 și 1000 W).

Modificarea regimului de funcționare este ușurată de existența unui obturator amplasat în fața capsulei radiometrice iar în timpul lucrului, a unui alt obturator, amplasat în fața lentilei de focalizare, obturator ce dă posibilitatea alimentării cu semifabricate a mesei de lucru fără oprirea emisiei laser.

Ambele obturatoare au și rolul de protecție împotriva radiației, suprafețele lor receptoare fiind brunate chimic și având formă conică cu unghiul calculat corespunzător. Obturatorul lentilei este răcit cu apă de la rețea prin intermediul unui distribuitor montat pe suportul mesei portobiect.

Focalizarea fasciculului laser la suprafața obiectului supus prelucrării este asigurată cu ajutorul unei lentile din CdTe cu distanța focală de 63,5 mm de tip convergent-divergent. O parte din energia laserului este absorbită de către lentilă ceea ce determină o încălzire a acesteia. Din această cauză s-a prevăzut răcirea corpului portlentilă, răcire asigurată cu apă de la rețea prin intermediul aceluiași distribuitor ca și obturatorul lentilei.

Corpul portlentilă este prevăzut cu olivă pentru montarea conductei de aducțiune a gazului ajutător și cu orificiu în care se montează duza de suflare a gazului.

Construcția corpului portlentilă permite utilizarea unor lentile având focala în intervalul 61 - 71 mm. Schimbarea lentilei se realizează rapid, corpul portlentilă fiind montat în corpul dispozitivului printr-un sistem tip baionetă.

În funcție de dimensiunile piesei supuse prelucrării și de distanța focală a lentilei utilizate, suportul principal al dispozitivului se poate deplasa în plan vertical printr-un sistem șurub-piuliță acționat manual.

Prezența radiometrului laser IR 1000, cât și soluția constructivă adoptată, face posibilă utilizarea acestui dispozitiv în cazul testării generatorului laser în diferite regimuri de funcționare cu urmărirea imediată a efectului obținut la obiectul

de prelucrat, putându-se stabili regimurile optime de prelucrare a diferitelor materiale.

b) Subansamblul mesei port obiect.

Masa port obiect a dispozitivului este montată, ca de altfel și subansamblul de dirijare și focalizare a fasciculului laser, pe un suport așezat pe 4 reazeme reglabile; suport pe care mai este montat distribuitorul agentului de răcire și aparatura de comandă și control a dispozitivului.

Masa port obiect este acționată de la un motor electric de c.c., alimentat de la rețea prin intermediul unui autotransformator montat pe suportul dispozitivului.

Masa execută o mișcare după direcție transversală cu viteză variabilă continuu în intervalul 10 - 6000 mm/min. Această gamă de viteze se realizează în două trepte prin intermediul unei cutii de viteză interpusă între motorul electric și mecanismul de acționare al mesei, precum și prin modificarea turației motorului electric.

La cele două extremități ale ghidajului mesei sînt fixate microlimitatoare de cursă care comandă reversarea mișcării.

Panoul de comandă al dispozitivului cuprinde comutatorul de punere în funcțiune a acționării mesei cu vizualizare optică, un radiometru IR 1000 în trei trepte și comanda autotransformatorului.

4.2.4. Dispozitiv pentru tăiere și fracturare controlată la instalația laser LIR 100

Deoarece laserul cu CO₂ monomod LIR 100 a fost livrat de producător cu sistem de deviere în plan vertical și focalizare a radiației, pentru această instalație s-a realizat un dispozitiv pentru fixarea și deplasarea pieselor de revoluție, dispozitiv care oferă și posibilitatea unei mișcări de translație prin montarea unui cărucior corespunzător (fig.4.13).

Dispozitivul oferă următoarele posibilități de mișcare :

- o mișcare pe verticală cu antrenare manuală prin sistem pinion cremalieră,
- o mișcare de poziționare după direcție longitudinală cu mecanism șurub piuliță și antrenare manuală,
- o mișcare de rotație reversibilă pentru platoul de diametru \varnothing 300 mm realizată mecanic în limitele 1,3 - 7,8rot/min

- transmisie prin curea, acționare independentă,
- o mișcare de translație a căruciorului montat pe platou cu viteze de deplasare reglabile continuu în intervalul 0,55 - 6,75 m/min la o cursă a căruciorului de 30 mm.

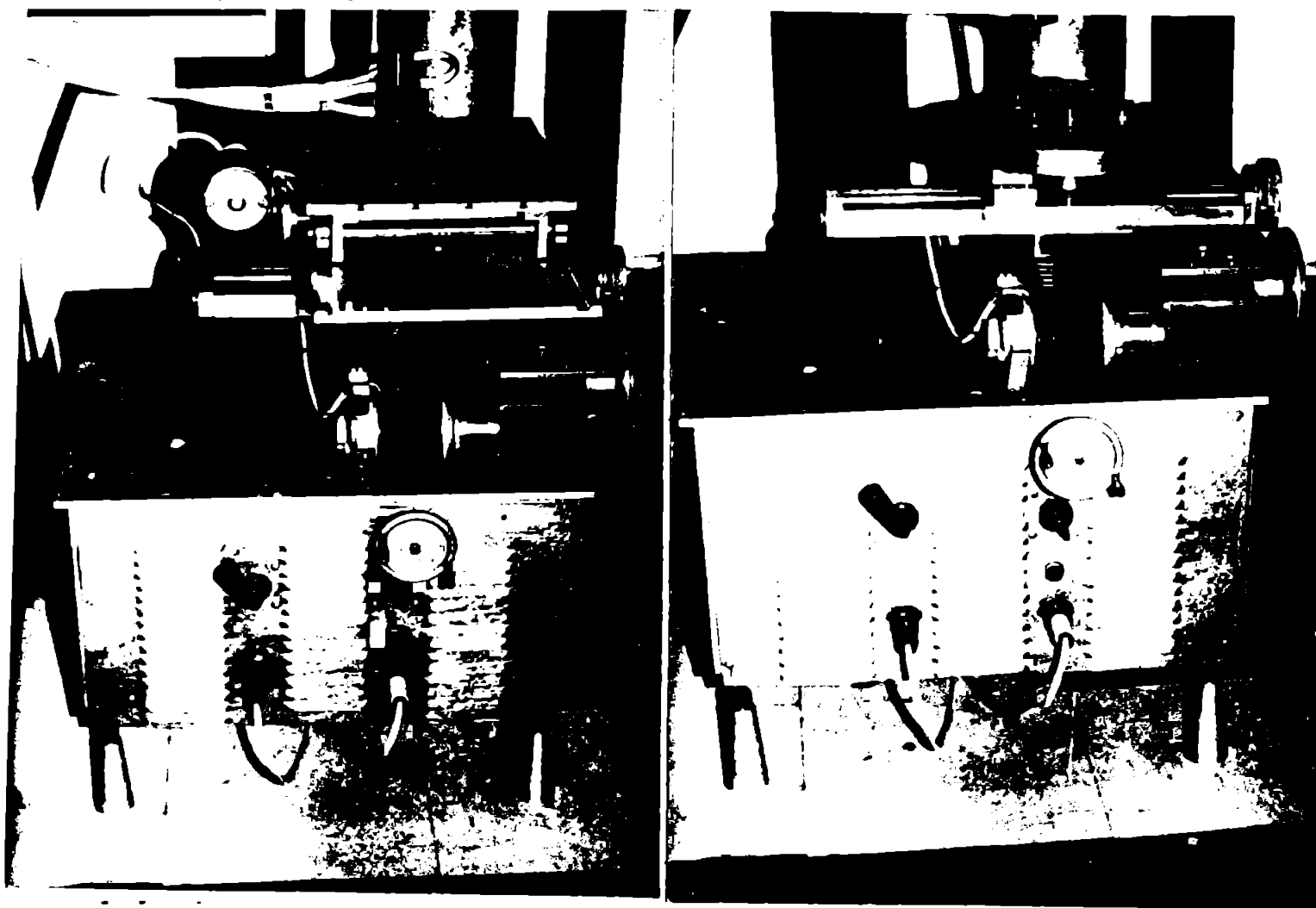


Fig.4.13. Dispozitiv de prelucrare la instalația laser LIR 100

Căruciorul cu deplasare transversală este acționat independent prin intermediul unui reductor melcat de la un motor electric de c.c. Cursa de deplasare a căruciorului este controlată cu ajutorul limitatoarelor de cursă cu avertizare și apoi reversare a mișcării.

Fixarea pieselor de revoluție se realizează în centrul platoului cu bride ce oferă posibilitatea autocentrării piesei pe platou.

Poziția capului de lucru al laserului la prelucrarea acestor piese este orizontală.

4.2.5. Dispozitiv de prelucrare cu gaz ajutător prefcälzit (fig.4.14)

Dispozitivul este realizat astfel încât poate fi adaptat la orice laser cu CO₂, prin simpla dispunere în fața fasciculului,

obținându-se devierea în plan vertical și focalizarea radiației laser.

Răcirea corpului port lentilă și a lentilei se asigură în acest caz cu ajutorul aerului comprimat introdus în corpul dispozitivului printr-o olivă și apoi circulat forțat prin serpentina corpului de răcire. Pentru protecția ambelor fețe ale lentilei o parte a aerului este trimisă prin orificiile radiale ale corpului deasupra lentilei.

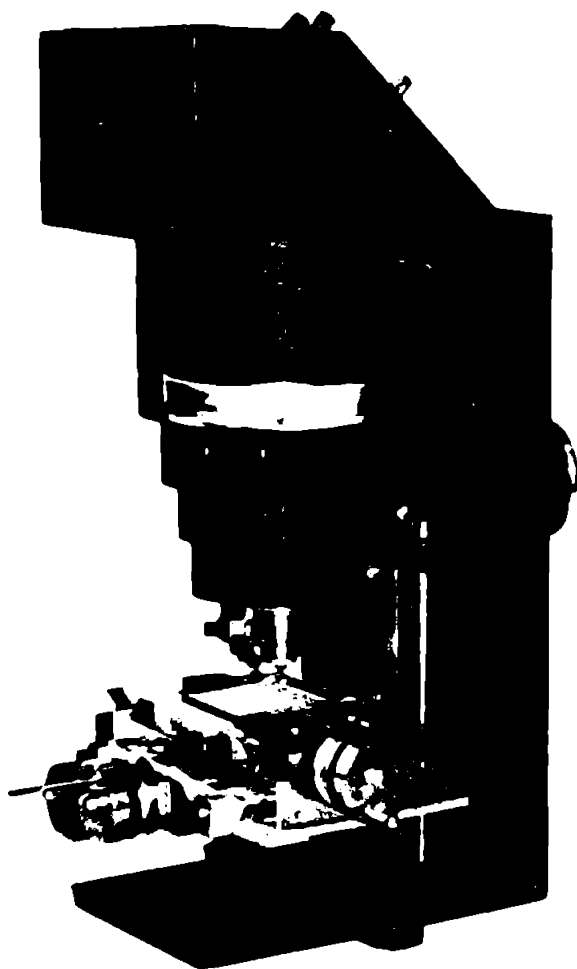


Fig.4.14. Dispozitiv de prelucrare cu gaz ajutător preîncălzit

Gazul ajutător este preîncălzit la o temperatură de 600°C într-un încălzitor tip schimbător de căldură cu ajutorul unui rezistor înfășurat pe un cilindru din șamotă și este adus printr-o conductă metalică scurtă la inelul circular al corpului de suflare. De aici, prin orificii dispuse radial este condus către duza de suflare și este trimis asupra piesei de prelucrat.

Pentru dirijarea gazului preîncălzit către piesa de prelucrat și limitarea volumului de gaz cald ce ajunge la lentilă, s-a ales o formă interioară corespunzătoare a corpului de suflare și s-au montat o serie de diafragme în corpul dispozitivului.

Masa port obiect a dispozitivului asigură mișcări după cele trei axe de coordonate, mișcările longitudinale și transversale putând fi realizate și mecanic, tamburii de acționare fiind prevăzuți cu roată de curea. Poziționarea mesei față de duza de suflare a gazului se realizează printr-un angrenaj conic acționat manual.

4.3. Considerații finale

La ora actuală singurul producător de laseri din țara noastră este Institutul de Fizică și Tehnologia Aparatelor cu Radiații (IFTAR) București. Se produc aici o mare diversitate de laseri, în mare majoritate modele experimentale, care în domeniul prelucrării materialelor au încă o modestă răspândire industrială.

În lucrare se prezintă experimentările efectuate pe 5 astfel de instalații ; numărul relativ ridicat al acestora fiind determinat tocmai de faptul că deși literatura de specialitate oferă o serie de rezultate în domeniul prelucrării materialelor, se cunoaște încă foarte puțin despre caracteristicile și posibilitățile de folosire a laserilor de producție românească.

Această formă de abordare a cercetărilor a apărut datorită faptului că o serie de întreprinderi din localitate și din localități învecinate au manifestat interes deosebit față de posibilitatea implementării în producție a unor astfel de instalații. S-a impus deci formarea unei imagini referitoare la posibilitățile de aplicare industrială a procedeelor de prelucrare pe aceste instalații.

Intrucât producătorul nu a oferit la timpul respectiv dispozitive auxiliare pentru instalațiile livrate, s-a impus proiectarea și realizarea unor dispozitive destinate prelucrării materialelor pe instalațiile respective, dispozitive realizate cu un grad de universalitate ridicat, astfel încât să poată fi abordate prelucrării de materiale cât mai diverse.

Încercările efectuate ulterior și ale căror rezultate sînt prezentate în capitolele următoare au arătat justetea acestui mod de abordare a problemei construcției acestor dispozitive.

S-a încercat de asemenea, stabilirea unei metodologii de realizarea a proiectării acestor dispozitive la alegerea lentilei de focalizat și a duzei de suflare a gazului, elemente ce determină forma și gabaritul acestor dispozitive.

5. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND
INFLUENTA PARAMETRILOR PROCESULUI ASUPRA CA-
RACTERISTICILOR DE PRELUCRARE LA GAURIREA CU
AJUTORUL LASERULUI

5.1. Parametrii tehnologici la prelucrarea cu laserul
"Neodim 15" a orificiilor în oțel inoxidabil 20Cr130
(STAS 3583/80)

Complexitatea proceselor de interacțiune radiație-materie, implicate în prelucrarea cu laser a materialelor, determină necesitatea studiilor de detaliu pentru fiecare material și aplicație tehnologică în parte.

Acțiunea radiației laser focalizate asupra materialelor opace, la o intensitate adecvată a acesteia $[I > 10^7 \text{ W/cm}^2]$, generează procese de fuziune și vaporizare care conduc la prelevare de material.

Numărul parametrilor implicați în procesul de prelucrare este foarte mare. În ansamblu, aceștia pot fi considerați ca variabile independente, specifice fiecărui utilaj de prelucrare, selecționarea putându-se face de către operator dintr-o gamă largă de posibilități de reglare.

Instalația folosită la experimentări, "Neodim 15", este un laser cu destinații multiple, atât la realizarea microalezajelor în materiale nemetalice (rubin, diamant, safir, etc.) cât și în materiale metalice, deci are un domeniu larg de aplicații industriale. Din acest motiv, numărul mare de combinații posibile ale parametrilor instalației creează dificultăți privind alegerea valorilor care să conducă la un regim optim de prelucrare, fie sub aspect cantitativ fie calitativ.

Dacă se consideră procesul de prelucrare cu laser ca un proces de transformare sistemic, se pot evidenția două categorii de mărimi (fig.5.1) :

- a) mărimi de intrare și
b) mărimi de ieșire .

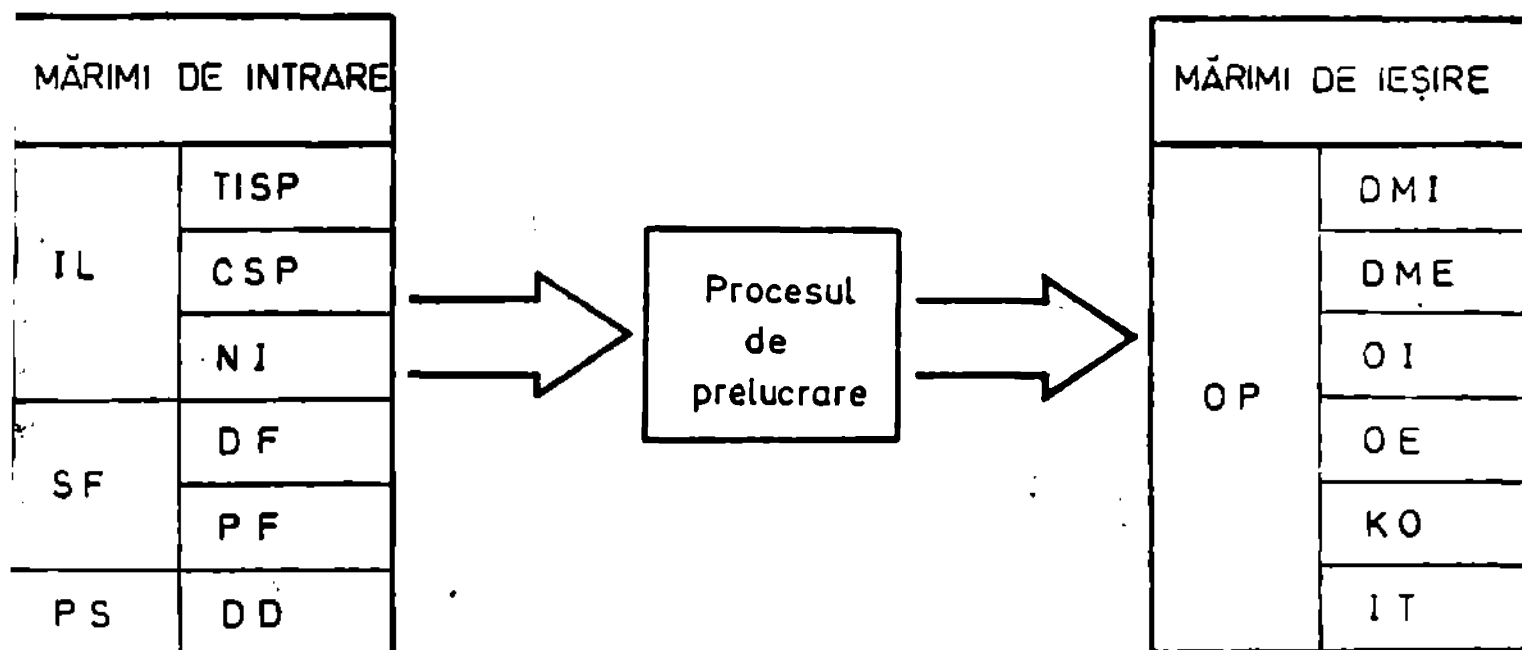


Fig. 5.1. Mărimile principale ale procesului de prelucrare cu laser a microalezajelor

- a) Mărimile de intrare ale procesului de prelucrare provin;
- a.1) de la instalația laser utilizată (IL) și pot fi definite prin :
- T.I.S.P - tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj, parametru ce poate fi reglat de către operator, continuu, în intervalul 3.00 - 3.000 V;
- C.S.P. - capacitatea sistemului de pompaj, parametru specific instalației "Neodim 15" realizat prin doi condensatori de 450 μ F fiecare, putând fi utilizați individual sau împreună;
- N.I. - numărul impulsurilor aplicate;
- a.2) de la sistemul de focalizare (SF) utilizat și pot fi definite prin :
- D.F. - distanța focală a sistemului de focalizare utilizat, parametru care, datorită posibilităților existente, a putut fi considerat doar la două nivele $f_1=60$ mm, $f_2= 30$ mm;

- P.F. - poziția petei focale față de suprafața semifabricatului, parametru ce poate fi variat continuu pe întreaga grosime a materialului prelucrat;
- a.3) din condiții introduse suplimentar (P.S) în vederea asigurării unei distribuții cât mai uniforme a energiei în axa fasciculului focalizat, și definite prin:
- D.D. - diametru diafragmei utilizate, diafragmă introdusă în fața fasciculului laser la ieșirea acestuia din cavitatea rezonantă.

Deoarece măsurile considerate ca funcții de răspuns nu au putut fi măsurate decât în ipoteza străpungerii orificiilor prelucrate s-a renunțat, în desfășurarea ulterioară a experimentelor, la numărul de impulsuri ca mărime de intrare. În urma unor încercări preliminare /33,34,36/ s-a dovedit influența nesemnificativă a capacității sistemului de pompaaj, motiv pentru care, în desfășurarea ulterioară a experimentelor, nici acest parametru nu s-a luat în considerare, el fiind menținut la nivel constant.

b) Mărimile de ieșire ale procesului de prelucrare provin în exclusivitate de la obiectul prelucrării (O.P). În cadrul cercetărilor efectuate s-au analizat ca mărimi de ieșire doar elementele ce definesc precizia de dimensiune și de formă geometrică a orificiilor obținute prin găurire cu laserul, mărimi denumite "criterii de performanță" sau "funcții de răspuns".

Intrucât literatura de specialitate nu oferă date concludente referitoare la problema analizată s-au considerat, în primă fază a experimentărilor, drept funcție de răspuns ale procesului de prelucrare următoarele :

- D.M.I. - diametrul mediu al orificiului măsurat pe suprafața de intrare a fasciculului laser în material;
- D.M.E. - diametrul mediu al orificiului măsurat pe suprafața de ieșire a fasciculului laser din material;
- O.I. - ovalitatea orificiului la intrarea fasciculului;
- O.E. - ovalitatea orificiului la ieșirea fasciculului;
- K.O. - conicitatea alzajului străpuns;
- I.T. - mărimea câmpului de toleranță în care se încadrează din punct de vedere al preciziei dimensionale alzajul realizat.

5.2. Stabilirea ordinii de importanță a parametrilor asupra funcțiilor de răspuns prin metoda bilanțului aleator.

Mărimile de intrare ale procesului de prelucrare reprezintă variabile independente ce se caracterizează printr-un anumit număr de posibilități de reglare denumite nivele de variație.

Considerând un număr minim de variabile independente : 5, fiecare cu câte 6 nivele de variație, se impune realizarea unui număr de $6^5 = 7776$ combinații posibile la aprecierea unei singure funcții de răspuns. Dacă se mărește numărul variabilelor independente, numărul total al experimentelor necesare crește considerabil. Realizarea unui asemenea număr de încercări este practic imposibilă. Pe lângă numărul mare de încercări necesare, metoda modificării succesive a unei variabile cu menținere constantă a celorlalte, prezintă și dezavantajul că nu sesizează interacțiunea factorilor și nu se poate aplica la scară industrială. De asemenea, menținerea parametrilor la o valoare riguros constantă este o problemă greu de rezolvat. Pe de altă parte, prin modificarea numai a unui singur parametru este aproape sigur că punctul optim al procesului se va ocoli.

Din acest motiv este necesară o metodă de cercetare prin care să se determine, printr-un număr limitat de experimentări, efectele pe care le au asupra funcțiilor de răspuns diversele combinații ale variabilelor independente.

O astfel de metodă de planificare a experimentărilor și analiză a rezultatelor este metoda bilanțului aleatoriu sau random /68,76/. Metoda permite realizarea unei ordonări a importanței variabilelor independente asupra funcțiilor de răspuns printr-un număr limitat de experimentări.

5.2.1. Stabilirea matricii de experimentare

În urma unor încercări preliminare prin care s-a stabilit influența nesemnificativă a unor variabile independente, s-a adoptat o matrice de experimentare ce cuprinde 36 de încercări, matrice care permite analiza variabilelor cu 2, 4 și 6 nivele. În acest fel, pentru matricea considerată, considerând o variabilă cu 4 nivele, fiecare nivel va apărea de 9 ori într-o ordine oarecare în seria de experimentări.

Variabilele luate în considerare și nivelele lor de variație se prezintă în tab.5.1.

Nr. crt.	Variabila independentă	Simbol	Unitatea de măsură	Nivele de variație						Nr. de nivele
				1	2	3	4	5	6	
1	Tensiunea de încărcare a condensatorului	U	V	2000	2200	2400	2600	2800	3000	6
2	Diametrul diafragmei	D	mm	5	6	7	8	9	10	6
3	Poziția focarului	h	mm	0	0,3 g	0,5 g	g*	—	—	4
4	Distanța focală a obiectivului	f	mm	30	60	—	—	—	—	2

* g - grosimea semifabricatului supus perforării

Tab. 5.1. Variabilele independente și nivelele lor de variație

Tensiunea de încărcare a condensatorilor U , cea care se aplică lămpii flash, s-a ales la 6 nivele în intervalul 2000-3000 V; la tensiuni inferioare valorii de 2000 V numărul de impulsuri aplicat pînă la străpungerea semifabricatului fiind relativ mare.

Diafragmarea fasciculusului laser nefocalizat a fost realizată în imediata vecinătate a zonei de extracție a acestuia din cavitatea rezonantă prin utilizarea unor diafragme interschimbabile de diametru D , stabilit la 6 nivele de variație. S-a recurs la diafragmare deoarece fasciculusul laser produs de instalația Neodim 15 are un caracter multimod și deci o distribuție neuniformă a energiei într-un plan perpendicular pe axa fasciculusului. Deși prin diafragmare energia fasciculusului se micșorează, obținerea unei distribuții mai apropiate de cea normală conduce la obținerea unor orificii de formă mult mai regulată decît în cazul perforării cu fasciculusul nediafragmat.

Pentru urmărirea unor condiții de eventuală refocalizare, s-a recurs la modificarea poziției petei focale față de suprafața semifabricatului. S-a realizat astfel focalizarea radiației laser, prin deplasarea controlată a probei față de planul focal al obiectivului, în 4 situații diferite, mergînd de la focalizare la suprafața

semifabricatului ($h=0$) pînă la o focalizare la nivelul suprafeței opuse a acestuia ($h=g$)

Condițiile de realizare a focalizării au fost dictate de dotarea instalației, dotare care cuprinde doar 2 obiective de focalizare avînd distanțele focale de $f=60$ mm și respectiv $f=30$ mm.

În baza variabilelor considerate și a nivelelor de variație adoptate pentru acestea a fost constituită matricea de experimentare (tab.5.2).

Nr. experienței	U		D		h		f		Nr. experienței	U		D		h		f	
	Cod	Valoarea [v]	Cod	Valoarea [mm]	Cod	Valoarea [mm]	Cod	Valoarea [mm]		Cod	Valoarea [v]	Cod	Valoarea [mm]	Cod	Valoarea [mm]	Cod	Valoarea [mm]
1	5	2800	5	9,0	4	1,0	1	30	19	4	2600	6	10,0	4	1,0	1	30
2	3	2400	6	10,0	2	0,3	2	60	20	5	2800	3	7,0	4	1,0	1	30
3	6	3000	3	7,0	2	0,3	2	60	21	2	2200	5	9,0	4	1,0	1	30
4	1	2000	2	6,0	1	0,0	2	60	22	4	2600	5	9,0	1	0,0	2	60
5	1	2000	1	5,0	1	0,0	2	60	23	6	3000	5	9,0	3	0,5	1	30
6	4	2600	1	5,0	1	0,0	2	60	24	2	2200	1	5,0	2	0,3	1	30
7	3	2400	1	5,0	1	0,0	2	60	25	6	3000	2	6,0	3	0,5	1	30
8	1	2000	5	9,0	4	1,0	2	60	26	2	2200	2	6,0	3	0,5	2	60
9	6	3000	2	6,0	1	0,0	1	30	27	4	2600	3	7,0	4	1,0	2	60
10	3	2400	3	7,0	2	0,3	2	60	28	5	2800	4	8,0	3	0,5	2	60
11	2	2200	6	10,0	3	0,5	2	60	29	6	3000	4	9,0	4	1,0	2	60
12	5	2800	1	5,0	2	0,3	2	60	30	2	2200	4	8,0	2	0,3	1	30
13	4	2600	6	10,0	1	0,0	1	30	31	3	2400	4	8,0	2	0,3	1	30
14	5	2800	2	6,0	3	0,5	1	30	32	2	2200	2	6,0	1	0,0	2	60
15	4	2600	1	5,0	3	0,5	2	60	33	1	2000	5	9,0	4	1,0	1	30
16	6	3000	3	7,0	4	1,0	1	30	34	5	2800	6	10,0	2	0,3	1	30
17	3	2400	4	8,0	3	0,5	1	30	35	1	2000	3	7,0	1	0,0	2	60
18	1	2000	4	8,0	2	0,3	1	30	36	3	2400	6	10,0	3	0,5	1	30

Tab. 5.2. Matricea de experimentare

Distribuția întâmplătoare a nivelelor pentru fiecare experiment, avînd ca scop amestecarea întâmplătoare a influențelor reciproce, a fost realizată cu ajutorul unui generator de numere aleatoare în ipoteza potrivit căreia, fiecare nivel de variație pentru o variabilă, trebuie să apară de același număr de ori în seria experimentelor.

Matricea de experimentare prezentată în tab.5.2 a fost utilizată în aceeași formă pentru analizarea fiecărei funcții de răspuns.

5.2.2. Criteriile de performanță și modul de realizare a experimentărilor

Problemele privind precizia de prelucrare a orificiilor cu ajutorul fasciculului laser sînt rar întîlnite în literatura de specialitate /76,78,81/ și se referă doar la unele componente ale acesteia.

Din aceste considerente, pentru cazul analizat în prezenta lucrare, se prezintă drept criterii de performanță elemente ale preciziei de dimensiune, exprimate prin diametrul orificiului prelucrat în diverse secțiuni și prin mărimea cîmpului de toleranță al diametrului; cît și elemente ale preciziei de formă geometrică a orificiului în secțiune transversală (ovalitatea) și longitudinală (conicitatea).

Materialul supus încercărilor a fost oțelul inoxidabil martensitic 20 Cr 130; STAS 3583-80 cu 0,24% C și 12,84% Cr (12-14%Cr) S-au utilizat epruvete din tablă cu grosimea de 1 și 1,5 mm (rezultatele fiind prezentate în continuare doar pentru grosimea de 1 mm), tablă din comerț, livrată în stare tratată (îmbunătățită). Oțelul are o largă întrebuințare în industria constructoare de mașini și farmaceutică (pentru confecționarea instrumentelor medicale fără tăiș).

Găurirea probelor s-a realizat pe instalația laser românească "Neodim 15", fiecare încercare fiind replicată de 6 ori. Încercările au fost efectuate în baza matricei de experimentare prezentată în tab.5.2, iar criteriile de performanță urmărite se prezintă în tab. 5.3.

Aceste funcții de răspuns au fost determinate fie prin măsurare directă fie în urma unor calcule analitice efectuate asupra unor mărimi determinate prin măsurare directă.

Datorită dimensiunilor foarte mici ale orificiilor obținute în urma prelucrării nu s-a putut realiza măsurarea acestora prin tehnici obișnuite de laborator.

Din aceste considerente, pentru măsurare s-a procedat în felul următor : fiecare orificiu a fost supus unei operații de fotografiere pe un microscop Neophot utilizînd obiective cu mărirea

nr. crt.	DENUMIREA FUNCȚIEI DE RĂSPUNS		SIMBOL	MODUL DE DETERMINARE	
1	* La nivelul suprafeței superioare	Diametrul orificiului	maxim	D_{iM}	măsurare directă
2			minim	D_{im}	măsurare directă
3			mediu	D_i	$\frac{1}{2} (D_{iM} + D_{im})$
4		Abateră de la circularitate		AF_{ci}	$\frac{1}{2} (D_{iM} - D_{im})$
5		Toleranța practică a diametrului		T_i	$D_{iMM} - D_{imm}$
6	La nivelul suprafeței inferioare	Diametrul orificiului	maxim	D_{eM}	măsurare directă
7			minim	D_{em}	măsurare directă
8			mediu	D_e	$\frac{1}{2} (D_{eM} + D_{em})$
9		Abateră de la circularitate		AF_{ce}	$\frac{1}{2} (D_{eM} - D_{em})$
10		Toleranța practică a diametrului		T_e	$D_{eMM} - D_{emm}$
11	Abateră de la cilindricitate		AF_l	$\frac{1}{2} (D_i - D_e)$	

* Suprafața superioară a semifabricatului este suprafața la nivelul căreia fasciculul laser intră în material, cea inferioară fiind suprafața opusă acesteia.

Ab. 5.3. Funcțiile de răspuns — simbolizare și mod de determinare

de 6,3x, 12,5x sau 25x la o mărire a ocularului de 16x. Ordinul de mărire al obiectivului a fost ales în funcție de dimensiunea orificiului fotografiat (fig.5.2 a și b).

La același ordin de mărire a fost fotografiată o scară a aparatului (fig.5.3) cu valoarea diviziunii de 0,01 mm.

Filmul pe care s-au fotografiat orificiile și scara care a avut același ordin de mărire au fost expuse la o mărire fotografică constantă astfel încât s-au păstrat nealterate proporțiile. S-au realizat astfel câte două fotografii pentru fiecare din cele 6 replici ale unui experiment (la intrare și respectiv ieșire); măsurarea acestora realizându-se cu scările reproduse în modul prezentat mai sus. Precizia de citire a fost mărită corespunzător prin trasarea unor repere suplimentare pe scara mărită.

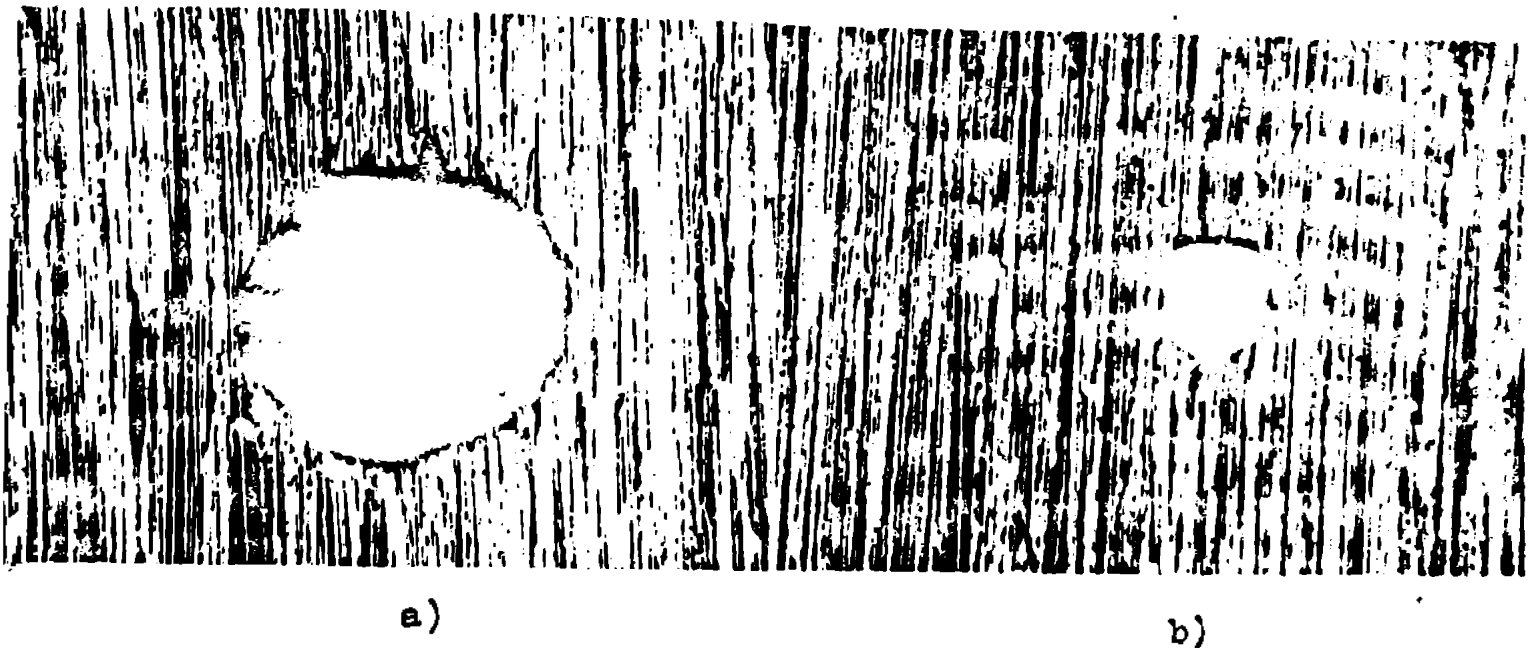


Fig.5.2. Alezaj obținut prin găurire cu laserul: a) la intrarea fascicului laser în material (6,3x) b) la ieșirea fascicului laser (12,5x)

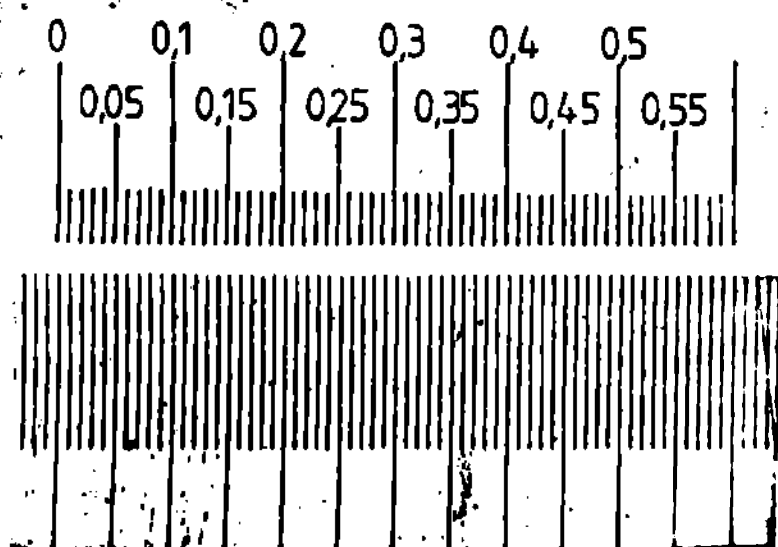


Fig.5.3. Scară cu valoarea diviziunii de 0,01 mm. ale diametrului maxim, obținut în aceleași condiții de experimentare

$$D_{iM} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k D_{iMj} \quad (5.1)$$

$j = 1, 2, \dots, 6; k=6;$

- minim, (D_{iM}) - analog pentru valorile minime ale diametrului:

$$D_{im} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k D_{imj} \quad (5.2)$$

- mediu (D_i) ca medie aritmetică a diametrelor medii obținute pentru fiecare din cele 6 experimente

Măsurarea a fost astfel realizată la o mărire variind între 200 și 300x, erorile de citire fiind astfel mult diminuate.

Funcțiile de răspuns analizate au fost determinate astfel:

a) diametrul orificiului la intrarea fascicului laser în material (fig.5.4) - maxim- D_{iM} - ca medie aritmetică a celor 6 valori

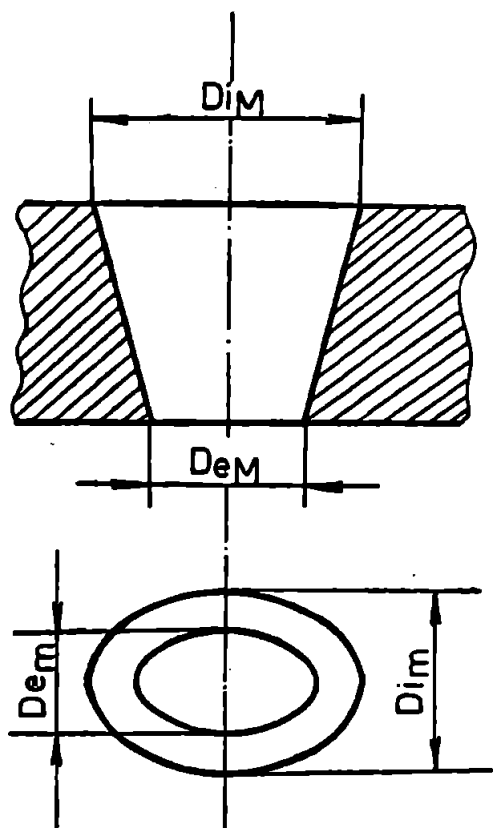


Fig. 5.4. Parametrii geometrice ai orificiului

$$D_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k D_{ij} \quad (5.3)$$

in care;

$$D_{ij} = \frac{D_{iMj} + D_{i_mj}}{2}$$

b) abaterea de la circularitate a diametrului de intrare (AF_{c_i}) s-a determinat după modelul de calcul a ovalității cu relația:

$$AF_{c_i} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{D_{iMj} - D_{i_mj}}{2} \quad (5.4)$$

c) toleranța practică a diametrului de intrare s-a determinat pe cale analitică cu relația:

$$T_i = D_{iMM} - D_{i_mm} \quad (5.5)$$

in care:

D_{iMM} - valoarea maximă a diametrului de intrare luată la cea mai mare valoare din seria celor 6 replici,

D_{i_mm} - valoarea minimă a diametrului de intrare luată la cea mai mică valoare din seria celor 6 replici.

d) diametrul orificiului la ieșirea fasciculului din material s-a determinat în aceleași condiții ca și diametrul de intrare:

- maxim (De_M):

$$De_M = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k De_{Mj} \quad (5.6)$$

$j = 1, 2, \dots, 6; k = 6$

- minim (De_m)

$$De_m = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k De_{mj} \quad (5.7)$$

- mediu:

$$D_e = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k D_{e_j} \quad (5.8)$$

în care:

$$D_{e_j} = \frac{D_{e_{Mj}} + D_{e_{mj}}}{2}$$

$$j = 1, 2, \dots, 6$$

e) abaterea de la circularitate a diametrului de ieșire (AF_{c_e}):

$$AF_{c_e} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{D_{e_{Mj}} - D_{e_{mj}}}{2} \quad (5.9)$$

f) toleranța practică a diametrului de ieșire :

$$T_e = D_{e_{MM}} - D_{e_{mm}} \quad (5.10)$$

în care;

$D_{e_{MM}}$ și $D_{e_{mm}}$ au aceeași semnificație ca și la punctul c) cu deosebirea că se referă la diametrul orificiului la ieșire;

g) abaterea de la cilindricitate (AF_l) s-a determinat după modelul de calcul al conicității, ca medie aritmetică a abaterilor pentru cele 6 replici realizate :

$$AF_l = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{D_{i_k} - D_{e_k}}{2} \quad (5.11)$$

$$j = 1, 2, \dots, 6; k=6.$$

Matricea funcțiilor de răspuns cu valorile determinate conform celor prezentate mai sus se redă în tab.5.4.

5.2.3. Program de calcul pentru aplicarea metodei bilanțului aleator

Datorită volumului mare de calcul necesar în vederea aplicării metodei bilanțului aleator s-a apelat la un program de calcul pe calculator, program ce respectă etapele de calcul specifice metodei. Aceasta prevede, pentru fiecare funcție de răspuns, parcurgerea următoarelor etape :

Nr. exp.	D_{iM} [mm]	D_{im} [mm]	D_i [mm]	D_{eM} [mm]	D_{em} [mm]	D_e [mm]	AF_{ci} [mm]	AF_{ce} [mm]	AF_l [mm]	T_i [mm]	T_e [mm]
1	0,600	0,416	0,508	0,260	0,255	0,257	0,0916	0,0041	0,1254	0,150	0,130
2	0,450	0,425	0,437	0,158	0,146	0,152	0,0125	0,0058	0,1425	0,150	0,090
3	0,566	0,491	0,529	0,228	0,215	0,221	0,0375	0,0066	0,1583	0,150	0,040
4	0,318	0,310	0,314	0,058	0,056	0,057	0,0041	0,0025	0,1290	0,100	0,050
5	0,281	0,250	0,265	0,048	0,040	0,044	0,0158	0,0041	0,1108	0,130	0,040
6	0,368	0,320	0,344	0,122	0,106	0,114	0,0241	0,0080	0,1130	0,250	0,170
7	0,300	0,258	0,279	0,090	0,086	0,088	0,0208	0,0016	0,1020	0,150	0,100
8	0,408	0,400	0,404	0,121	0,116	0,119	0,0041	0,0025	0,1429	0,045	0,030
9	0,233	0,225	0,229	0,128	0,126	0,127	0,0041	0,0008	0,0560	0,100	0,130
10	0,433	0,366	0,400	0,158	0,151	0,155	0,0333	0,0033	0,1225	0,200	0,170
11	0,433	0,391	0,412	0,210	0,191	0,200	0,0208	0,0091	0,1060	0,100	0,040
12	0,400	0,355	0,377	0,146	0,136	0,141	0,0225	0,0050	0,1181	0,170	0,140
13	0,360	0,343	0,351	0,133	0,125	0,129	0,0075	0,0041	0,1112	0,050	0,150
14	0,280	0,261	0,270	0,110	0,095	0,102	0,0090	0,0075	0,0838	0,160	0,100
15	0,345	0,305	0,325	0,088	0,080	0,083	0,0200	0,0033	0,1180	0,200	0,120
16	0,533	0,436	0,485	0,158	0,148	0,153	0,0483	0,0050	0,1658	0,200	0,200
17	0,400	0,330	0,366	0,143	0,135	0,139	0,0330	0,0116	0,1120	0,160	0,100
18	0,190	0,180	0,185	0,095	0,080	0,087	0,0140	0,0075	0,0500	0,050	0,050
19	0,503	0,466	0,485	0,253	0,240	0,246	0,0175	0,0065	0,1181	0,220	0,050
20	0,466	0,416	0,441	0,178	0,156	0,167	0,0250	0,0108	0,1370	0,050	0,120
21	0,458	0,383	0,420	0,153	0,152	0,152	0,0375	0,0008	0,1340	0,150	0,100
22	0,558	0,533	0,345	0,226	0,221	0,224	0,0125	0,0025	0,1610	0,100	0,100
23	0,460	0,416	0,441	0,153	0,148	0,150	0,0250	0,0041	0,1440	0,050	0,100
24	0,243	0,225	0,234	0,061	0,058	0,060	0,0091	0,0016	0,0860	0,100	0,100
25	0,268	0,248	0,258	0,090	0,083	0,086	0,0083	0,0033	0,0856	0,100	0,100
26	0,315	0,300	0,307	0,100	0,090	0,095	0,0075	0,0050	0,1062	0,100	0,100
27	0,500	0,433	0,466	0,210	0,200	0,205	0,0330	0,0060	0,1305	0,100	0,100
28	0,488	0,433	0,460	0,255	0,228	0,241	0,0275	0,0133	0,1095	0,100	0,100
29	0,566	0,520	0,543	0,258	0,241	0,250	0,0233	0,0100	0,1460	0,100	0,100
30	0,295	0,293	0,294	0,103	0,101	0,102	0,0004	0,0004	0,0958	0,100	0,100
31	0,355	0,323	0,339	0,151	0,133	0,142	0,0158	0,0091	0,0983	0,100	0,100
32	0,318	0,263	0,282	0,095	0,086	0,090	0,0191	0,0041	0,0956	0,100	0,100
33	0,400	0,358	0,379	0,136	0,133	0,134	0,0208	0,0016	0,1040	0,100	0,100
34	0,315	0,350	0,362	0,141	0,130	0,135	0,0125	0,0058	0,1133	0,100	0,100
35	0,358	0,316	0,337	0,095	0,090	0,092	0,0208	0,0250	0,210	0,200	0,100
36	0,333	0,316	0,325	0,198	0,190	0,194	0,0166	0,0041	0,0654	0,100	0,100

Tab. 5.4. Matricea funcțiilor de răspuns

- calcularea mediei funcției de răspuns analizate (\bar{x}) pentru fiecare nivel de variație al unei variabile independente (ex; pentru o variabilă cu 6 nivele se obțin 6 medii ale funcției de răspuns);
- se stabilește domeniul de variație (DV) pentru fiecare variabilă ca diferență între valoarea maximă și cea minimă ($DV = \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}$);
- se stabilește variabila cea mai semnificativă, variabila cu influența cea mai mare asupra funcției de răspuns, ca fiind variabila cu cel mai mare domeniu de variație (DV); obținându-se astfel o primă ordonare a variabilelor;
- se elimină efectul variabilei celei mai semnificative asupra funcției de răspuns astfel: se calculează media generală a funcțiilor de răspuns ca medie a mediilor de pe nivele ($\bar{\bar{x}}$); se face diferența dintre media generală ($\bar{\bar{x}}$) și media pe nivel a variabilei deja selectate; se adaugă această diferență la valoarea funcției de răspuns acolo unde variabila care a fost prima selectată are nivelul respectiv; astfel, domeniul de variație a variabilei selectate în ordinea mărimii efectului va fi zero, deci se elimină efectul ei în continuare;
- se ordonează în același mod variabilele rămase (cu una mai puțin) până se cunoaște ordinea de importanță a tuturor variabilelor analizate.

Metoda are o mare capacitate de separare a efectelor dominante, neexistând pericolul ca un factor ne semnificativ să fie considerat semnificativ.

Programul de calcul utilizat /28/, rezultat ca urmare a generalizării unui program FORTRAN, s-a obținut cu ajutorul limbajului de macrogenerare MAGIRIS, compatibil cu orice sistem de calcul FELIX C256. Acest program respectă întocmai etapele de calcul ale metodei bilanțului aleator.

Cunoscând matricea de experimentare, se inițiază la începutul programului indicii care determină matricea de experimentare. Ca rezultat, sistemul de calcul FELIX C256 generează cu ajutorul programului magiris un program în FORTRAN, exact adaptat cazului dat. Indicii care trebuiesc inițializați sînt : numărul încercărilor, numărul variabilelor, numărul maxim de nivele de variație ale variabilei și numărul funcțiilor de răspuns urmărite.

Programul principal folosește 3 subrutine, care rezolvă cîte o etapă de calcul (fig.5.5 a,b,c); schema logică a programului fiind prezentată în fig.5.6.

```

SUBROUTINE ORDINE ( DVY, NS, LPSCRIS, L )
DIMENSION DVY ( 36 ), PSCRIS ( 36 ), Z ( 36 ), ZY ( 36 )
DO 1 I=1, NS
1 Z(I)=DVY ( I )
4 LZ=0
L=1
3 IF ( Z ( L ) . LE . Z ( L + 1 ) ) GOTO 2
B=Z ( L )
Z ( L ) = Z ( L + 1 )
Z ( L + 1 ) = B
LZ=LZ+1
2 L=L+1
IF ( L . LT . NS ) GOTO 3
IF ( LZ . EQ . 1 ) GOTO 4
L=1
ZY ( 1 ) = Z ( 1 )
DO 5 I=2, NS
IF ( Z ( I ) . EQ . Z ( I - 1 ) ) GOTO 5
L=L+1
ZY ( L ) = Z ( I )
5 CONTINUE
DO 6 LL=1, L
DO 6 I=1, NS
IF ( ZY ( LL ) . EQ . DVY ( I ) ) LPSCRIS ( I ) = LL
6 CONTINUE
RETURN
END

```

a)

```

SUBROUTINE MEDIA ( MZ, YC, I, A, YM )
DIMENSION MZ ( 36, 4 ), YC ( 36 ), A ( 4 ), YM ( 6, 4 )
L=A(I)
DO 1 J=1, L
LL=0
YM ( J, I ) = 0
DO 2 JJ=1, 36
IF ( MZ ( JJ, I ) . NE . J ) GOTO 2
YM ( J, I ) = Y1 ( J, I ) + YC ( JJ )
LL=LL+1
2 CONTINUE
YM ( J, I ) = YM ( J, I ) / LL
1 CONTINUE
RETURN
END

```

b)

```

SUBROUTINE DOMVAR ( YM, I, A, DVYP )
DIMENSION YM ( 6, 4 ), A ( 4 )
L=A(I)
YMINIM = YM ( 1, I )
YMAXIM = YM ( 1, I )
DO 1 J=2, L
IF ( YM ( J, I ) . LT . YMINIM ) YMINIM = YM ( J, I )
IF ( YM ( J, I ) . GT . YMAXIM ) YMAXIM = YM ( J, I )
1 CONTINUE
DVYP = YMAXIM - YMINIM
RETURN
END

```

c)

Fig. 5.5. Subprograme utilize : a) ORDINE
b) MEDIA
c) DOMVAR

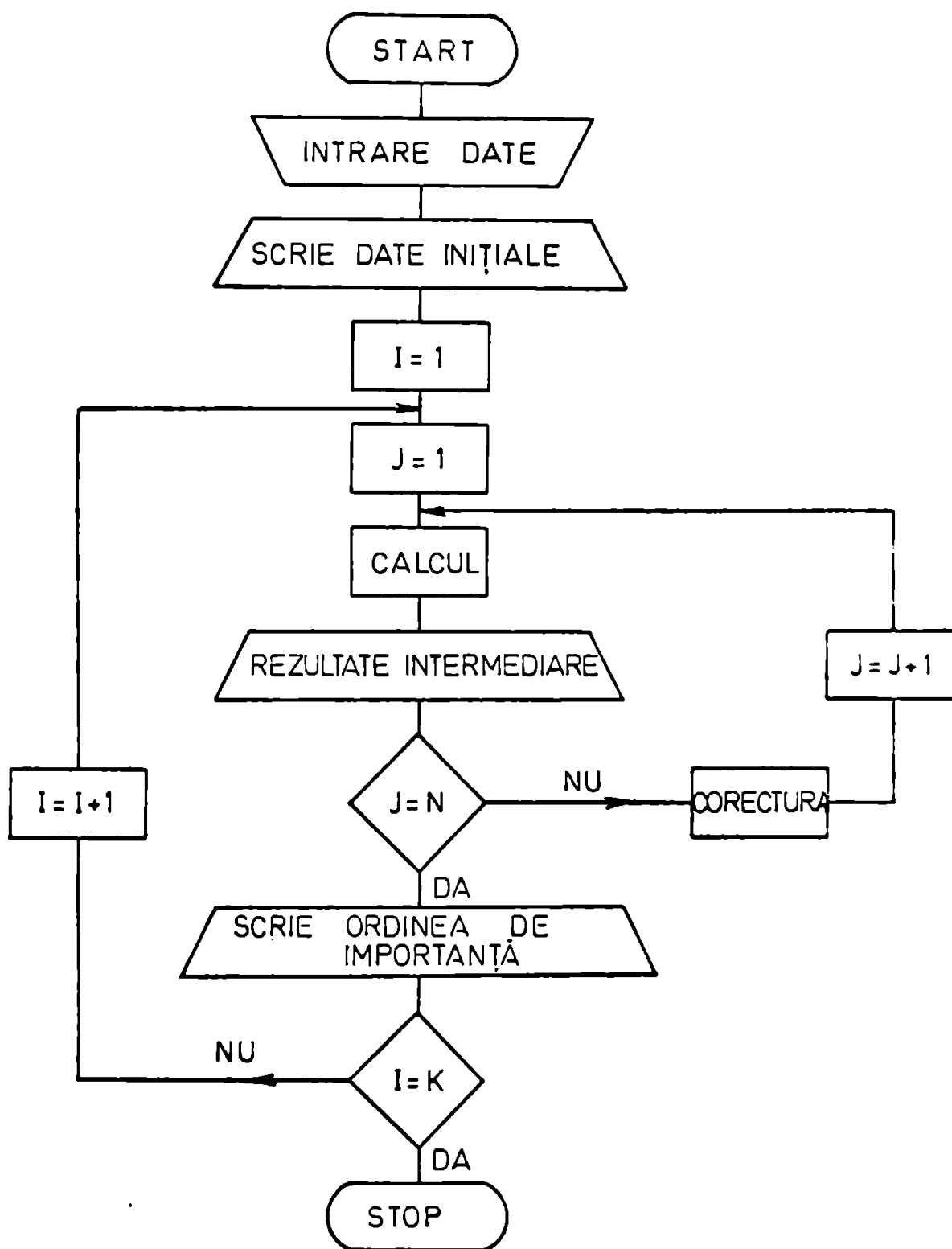


Fig. 5.6. Schema logică de calcul pentru ordonarea variabilelor

Programul de calcul utilizat are un înalt grad de universalitate, intervenția experimentatorului constând în inițializarea indicilor ce determină dimensiunea experimentului (4 cartele) precum și prin introducerea setului de cartele de date.

Rezultatele fiecărei etape de calcul se prezintă sub formă tabelară, în final, după efectuarea tuturor corecțiilor, prezentându-se ordinea de importanță a variabilelor.

5.2.4. Aprecieri cu privire la rezultatele obținute

Programul de calcul utilizat redă pentru fiecare funcție de răspuns analizată, sub formă tabelară, ordinea de importanță a variabilelor independente considerate.

După stabilirea variabilei cu cea mai mare influență, funcție de domeniul de variație al funcției de răspuns, se efectuează corecțiile necesare eliminându-se treptat fiecare variabilă.

Se pot astfel întocmi tabele pentru fiecare funcție de răspuns, tabele din care se poate deduce ordinea de importanță a variabilelor, domeniul de variație și valorile externe ale funcției de răspuns analizate.

Astfel, se observă că asupra valorii diametrului mediu de intrare (tab.5.5) și ieșire (tab.5.6), cea mai mare influență o are diametrul diafragmei D . Valorile acestor dimensiuni sînt influențate în ordine de tensiunea de încărcare a condensatorilor U ; gradul de influență al acestora asupra diametrului de ieșire al orificiului fiind foarte apropiat de cel al diametrului diafragmei (0,085 față de 0,087).

Urmează în ordine: distanța focală a obiectivului (f) și poziția focarului față de suprafața piesei (h). Tabele similare pot fi alcătuite pentru fiecare din cele 11 funcții de răspuns analizate, rezultatele obținute fiind sintetizate pentru toate aceste funcții în tab.5.7.

Ordinea de importanță a parametrilor privind influența acestora asupra valorii funcțiilor de răspuns analizate este prezentată în tab.5.8.

Analizînd datele din tabelele 5.7 și 5.8, se poate observa că aproape în totalitate precizia dimensională și de formă geometrică a orificiilor, executate în oțelul 20 Cr 130 cu laserul Neo-dim 15, este influențată esențial de mărimea diametrului diafragmei.

Nr. var.	Variabila indep.	Nivelul de variație	Valori inițiale		După corecția I-a		După corecția II-a	
			\bar{x}	Dv	\bar{x}	Dv	\bar{x}	Dv
1	U [v]	2 000	0,31400	0,10533	0,30497	0,10581*		
		2 200	0,32483		0,35256			
		2 400	0,35767		0,35206			
		2 600	0,41933		0,40964			
		2 800	0,40300		0,40300			
		3 000	0,41417		0,41078			
2	D [mm]	5	0,30400	0,17283*				
		6	0,27667					
		7	0,44300					
		8	0,36450					
		9	0,44950					
		10	0,39533					
3	h [mm]	0	0,32733	0,13167	0,36285	0,05170	0,37288	0,03767
		0,3	0,35078		0,34759		0,35498	
		0,5	0,35156		0,37893		0,36816	
		1,0	0,45900		0,39930		0,39265	
4	f [mm]	30	0,35400	0,03633	0,34520	0,05393	0,33969	0,06494*
		60	0,39033		0,39913		0,40464	

Tab. 5.5. Valorile medii și domeniile de variație pentru D_i

Nr. var.	Variabila indep.	Nivelul de variație	Valori inițiale		După corecția I-a		După corecția II-a	
			\bar{x}	Dv	\bar{x}	Dv	\bar{x}	Dv
1	U [v]	2 000	0,08883	0,08500	0,08936	0,08447*		
		2 200	0,11667		0,12892			
		2 400	0,14500		0,13311			
		2 600	0,16683		0,16481			
		2 800	0,17383		0,17383			
		3 000	0,16367		0,16481			
2	D [mm]	5	0,08833	0,08767*				
		6	0,09200					
		7	0,16550					
		8	0,16017					
		9	0,17283					
		10	0,17600					
3	h [mm]	0	0,10722	0,07989	0,13244		0,14276	0,02774
		0,3	0,13278		0,12634	0,12893		
		0,5	0,14278		0,15086	0,14154		
		1,0	0,18711		0,16025	0,15666		
4	f [mm]	30	0,14211	0,00072	0,13284		0,12815	0,02865*
		60	0,14283		0,15210	0,15679		

Tab. 5.6. Valorile medii și domeniile de variație pentru D_e

FUNCTIA DE RĂSPUNS		DOMENII DE VARIATIE DETERMINATE DE :			
SIMBOL	MEDIA	U	D	h	f
D _{1M}	0,39325	0,11317	0,19200	0,14889	0,03628
		0,12094		0,06085	0,05298
				0,04925	0,06679
D _{1m}	0,35150	0,09767	0,14983	0,11222	0,03800
		0,09481		0,04283	0,05637
				0,02662	0,06437
D _i	0,37216	0,10533	0,17283	0,13167	0,03633
		0,10581		0,05170	0,05393
				0,03767	0,06494
D _{eM}	0,14750	0,0950	0,0967	0,08133	0,00122
		0,08828		0,03530	0,01993
				0,02846	0,02973
D _{em}	0,13797	0,08083	0,08650	0,07833	0,0050
		0,08092		0,03252	0,01789
				0,02663	0,02700
D _e	0,14247	0,08500	0,08767	0,07989	0,00072
		0,08447		0,03391	0,01926
				0,02774	0,02865
AF _{ci}	0,02097	0,01808	0,02430	0,01914	0,00204
		0,02098		0,00820	0,00259
				0,01027	0,00028
AF _{ce}	0,00573	0,00425	0,00685	0,00180	0,00161
		0,00336		0,0372	0,00159
		0,00393			0,00110
AF _l	0,11428	0,02133	0,04737	0,03042	0,01964
		0,01754		0,00765	0,01869
		0,02378		0,01088	
T _i	0,14513	0,06333	0,04833	0,03889	0,00361
			0,05028	0,02972	0,00852
				0,03897	0,00272
T _e	0,08611	0,08333	0,02833	0,02556	0,02333
			0,03167	0,03028	0,01130
				0,02308	0,01515

Tab. 5.7. Domeniile de variație ale funcțiilor de răspuns.

ORDINEA DE IMPORTANTĂ	FUNCTIILE DE RĂSPUNS ANALIZATE										
	D_{iM}	D_{im}	De_M	De_m	D_i	De	AF_{ci}	AF_{ce}	AF_l	T_i	Te
1	D	D	D	D	D	D	D	D	D	U	U
2	U	U	U	U	U	U	U	h	f	D	D
3	f	f	f	f	f	f	h	U	U	h	h
4	h	h	h	h	h	h	f	f	h	f	f

Tab. 5.8. Ordinea de importanță a parametrilor privind influența acestora asupra funcțiilor de răspuns.

Acest lucru se explică prin caracterul multimodal al spotului laser extras din această instalație, prin distribuția sa neuniformă de-a lungul unui plan perpendicular pe axa fasciculului. Diafragma realizează o reducere a dispersiei energiei față de axa fasciculului și deși determină o diminuare a efectului termic al acestuia, contribuie la îmbunătățirea substanțială a parametrilor de precizie.

Se observă de asemenea că o pondere însemnată în obținerea unor orificii cât mai apropiate de forma ideală, o are tensiunea (U) de încărcare a condensatorilor și deci energia fasciculului laser utilizat.

La marea majoritate a funcțiilor de răspuns analizate, mărirea tensiunii de încărcare a condensatorilor are o pondere ce ocupă locul 2, uneori chiar primul loc (T_i , Te), este însă mai puțin semnificativă atunci când se analizează conicitatea orificiului și ovalitatea diametrului de ieșire.

Urmează, în ordinea importanței, distanța focală a sistemului de focalizare utilizat, ea fiind al treilea parametru atunci când se analizează precizia de dimensiune.

Privind precizia de formă geometrică, distanța focală (f) are o influență promițătoare asupra mărimii conicității (AF_1) (locul 2) și este absolut nesemnificativă privind mărirea abaterilor de la circularitate ale orificiului.

Ovalitatea este în schimb influențată semnificativ (în afară de mărimea diametrului diafragmei) de poziția focarului (h) (locul 2 privind diametrul de ieșire și locul 3 la diametrul de intrare)

Asupra celorlalte criterii de performanță, poziția petei focale este neesențială sau cu un grad de influență redus.

Ar fi posibil, totuși, ca la grosimi mai mari ale materialului poziția petei focale să capete o semnificație mai însemnată.

5.3. Modelarea matematică a procesului tehnologic de prelucrare

Prelucrarea cu laser a materialelor constituie un sistem complex de acțiune care cuprinde un număr mare de parametri ce sînt legați între ei prin relații de interdependență.

Pentru descrierea procesului de prelucrare ar fi ideal să se poată stabili un model matematic din care să rezulte influența tuturor factorilor analizați și a interacțiunii acestora. Găsirea unui model matematic real este deosebit de dificilă și ar presupune un număr infinit de experimentări. Din acest motiv, se recurge în mod obișnuit la elaborarea unui model matematic aproximativ, model ce poate fi elaborat pe baza analizei statistice.

Pentru a stabili o legătură între mărimile de intrare în sistem (variabilele independente) care constituie așa numitul regim de prelucrare și caracteristicile tehnologice urmărite (funcțiile de răspuns) este necesar să se găsească o funcție matematică, pe baza analizei de regresie, care să descrie forma legăturii; funcție denumită model matematic al procesului de prelucrare.

Modelul matematic găsit trebuie să fie verificat, prin analiza de corelație, pentru a vedea în ce măsură descrie comportarea sistemului.

Metodele statistice ale teoriei corelației multiple permit determinarea influenței mai multor parametri asupra funcțiilor de răspuns ale procesului prin limitarea experimentelor la o selecție din întreaga populație.

5.3.1. Modelul matematic general pentru o funcție cu mai multe variabile independente

Modelul matematic al unui proces se exprimă sub forma unei dependențe funcționale între funcția de răspuns analizată și o serie de variabile independente a căror valoare poate fi controlată cu exactitate. Matematic, dependența poate fi scrisă :

$$r = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (5.12)$$

în care: r - funcția de răspuns ce trebuie determinată,

x_1, x_2, \dots, x_k - variabile independente cunoscute.

Pentru determinarea lui r se efectuează un număr de experiențe, ordonate într-un anume fel, ansamblul acestora fiind considerat un experiment.

Dezvoltând funcția r în serie Taylor, în jurul unui punct convenabil, considerat centrul experimentului, de coordonate $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0})$ se obține :

$$r = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}) + \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{x_{i0}} \cdot x_i + \sum_{i < j}^k \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{x_{i0}, x_{j0}} \cdot x_i \cdot x_j + \dots \quad (5.13)$$

Funcția f nefiind cunoscută, derivatele parțiale din expresia 5.13 nu pot fi calculate, din care cauză se înlocuiește f cu o expresie polinomială.

$$r = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots \quad (5.14)$$

Coefficienții $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \dots$ nu pot fi determinați pe cale experimentală decât cu oarecare aproximație.

Se obține astfel un polinom de aproximație y , definit experimental, polinom a cărui coeficienți sînt estimațiile coeficienților $\beta_i, \beta_{ij}, \dots$

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (5.15)$$

Polinomul de aproximare y diferă de răspunsul adevărat, datorită erorii experimentale ξ :

$$r = y + \xi \quad (5.16)$$

Pentru determinarea estimațiilor b ale coeficienților β se folosește preferențial metoda celor mai mici pătrate.

În baza acestor observații a fost adoptat un sistem de experimentare programat statistic, sistem care presupune varierea simultană a mai multor variabile independente, efectele fiecăreia precum și al interacțiunii lor fiind determinate separat.

5.3.2. Experimentul factorial

Se cunoaște că prin experiment factorial se înțelege un program experimental care cuprinde numai experimentele strict necesare obținerii informațiilor dorite privind procesul analizat.

Experimentarea constă în modificarea convenabilă a diferiților factori (mărimi de intrare) angajați în desfășurarea procesului în scopul de a stabili combinația de factori optimă care să permită obținerea rezultatelor dorite.

Experimentarea factorială face posibilă estimarea efectelor factorilor și interacțiunii dintre ei, respectiv formularea ecuației care descrie această funcție sub forma unui polinom, coeficienții atașați variabilelor independente putând fi stabiliți prin analiza de regresie. Funcția de răspuns reprezintă o suprafață, sau o hipersuprafață de regresie, în raport cu numărul variabilelor independente angajate în proces.

Dintre toate tipurile de experimente factoriale cea mai mare utilizare o au aranjamentele de tip 2^n , ele fiind cele mai simple și necesitând cel mai mic număr de experiențe.

În baza ordonării parametrilor procesului de prelucrare prin gradul de influență al acestora asupra funcțiilor de răspuns, ordonare prezentată în paragraful precedent, s-a recurs în continuare, la un experiment factorial de tipul 2^3 , deoarece poziția petei focale are o influență nesemnificativă asupra majorității funcțiilor de răspuns. Parametrul h a fost, din aceste considerente, menținut la o valoare constantă.

Schema aranjamentului factorial complet de tip 2^3 este prezentat în tab. 5.9.

VARIABILA INDEPENDENTĂ			COMBINAȚIA
x_1	x_2	x_3	
x_{11}	x_{21}	x_{31}	$x_{11} x_{21} x_{31}$
		x_{32}	$x_{11} x_{21} x_{32}$
	x_{22}	x_{31}	$x_{11} x_{22} x_{31}$
		x_{32}	$x_{11} x_{22} x_{32}$
x_{12}	x_{21}	x_{31}	$x_{12} x_{21} x_{31}$
		x_{32}	$x_{12} x_{21} x_{32}$
	x_{22}	x_{31}	$x_{12} x_{22} x_{31}$
		x_{32}	$x_{12} x_{22} x_{32}$

Tab. 5.9. Schema aranjamentului factorial

s-a alcătuit matricea de experimentare cu valori naturale, matrice ce a stat la baza efectuării încercărilor experimentale. Cele $N=8$ experimente, realizate în baza combinațiilor variabilelor independente prezentate în tab. 5.11 au fost efectuate în condițiile descrise la paragraful 5.2.2.

NIVELELE VARIABILELOR	SIMBOL	x_1 U [v]	x_2 D [mm]	x_3 f [mm]	VALOAREA CODIFICATĂ
Nivelul superior	x_{11}	3 000	10	60	+ 1
Nivelul de bază	x_{10}	2 600	8	45	0
Nivelul inferior	x_{12}	2 200	6	30	- 1
intervalul de variație	Δx_i	400	2	15	-

Tab. 5.10. Nivelele variabilelor independente considerate

Variabilele independente considerate au fost: $x_1=U$ [V] - tensiunea de încărcare a condensatorilor, $x_2=D$ [mm] - diametrul diafragmei interpusă în fața fasciculului laser, $x_3=f$ [mm] - distanța focală a obiectivului de focalizare.

Pentru fiecare din aceste variabile s-a considerat un interval semnificativ de variație, stabilit prin analiza rezultatelor prezentate tabelar de programul de calcul (vezi tab. 5.5 și 5.6).

Nivelele de variație considerate pentru variabilele independente precum și intervalele de variație ale acestora sînt prezentate în tab. 5.10.

În baza schemei aranjamentului factorial prezentată în tab. 5.5

Nr exp	x_1 [v]	x_2 [mm]	x_3 [mm]
1	2 200	6	30
2	3 000	6	30
3	2 200	10	30
4	3 000	10	30
5	2 200	6	60
6	3 000	6	60
7	2 200	10	60
8	3 000	10	60

Tab. 5.11. Matricea de experimentare cu valori naturale

Realizarea efectivă a experimentelor s-a desfășurat în succesiune randomizată cu ajutorul unui generator de numere aleatoare.

Fiecare experiență a fost replicată de un număr $n = 3$ ori.

Valorile naturale ale variabilelor independente s-au transformat în valori codificate considerându-se pentru nivelul superior valoarea (+1) iar pentru nivelul inferior valoarea (-1), valori codificate definite conform relației :

$$X_i = \frac{x_{ij} - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (5.17)$$

$i = 1, 2, 3; j = 1, 2$

în care: X_i - valoarea codificată a variabilei,

x_{ij} - valoarea naturală a acesteia,

x_{i0} - valoarea naturală a nivelului de bază,

Δx_i - intervalul de variație al variabilei în valoare naturală față de nivelul de bază.

Pentru a putea calcula media funcțiilor de răspuns a fost necesară introducerea unei variabile fictive x_0 . Elementul matricii de experimentare are forma generală :

$$X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{0n} & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \quad (5.18)$$

Introducând variabilele independente la valoarea lor codificată, pentru un experiment factorial $2^3 = 8$ încercări, și considerând și interacțiunile ce pot apărea, se obține matricea completă de planificare a experiențelor (tab.5.12)

Nr. exp	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Tab. 5.12. Programul factorial 2³

5.3.3. Determinarea polinoamelor funcțiilor de răspuns prin analiza de regresie

Funcțiile de răspuns analizate în urma experimentului factorial prezentat precum și metoda utilizată pentru determinarea valorilor numerice ale acestora (măsurarea) au fost prezentate în paragraful 5.2.2. S-a introdus în plus, ca funcție de răspuns, durata de prelucrare exprimată prin timpul efectiv de prelucrare a orificiului până la străpungerea acestuia : τ_p [μ s] . Durata prelucrării s-a determinat ca produs între numărul de impulsuri aplicate până la străpungerea materialului și durata unui impuls, durată dată de constructorul utilajului. Din aceste considerente a fost necesară vizualizarea craterului după fiecare impuls aplicat.

5.3.3.1. Testarea datelor experimentale

Valorile funcțiilor de răspuns au fost determinate prin măsurare directă sau calculate după relațiile prezentate în paragraful 5.2.2 pentru fiecare experiment.

S-au determinat valorile medii ale funcțiilor de răspuns pentru fiecare experiment cu ajutorul relației :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n y_r$$

(5.19)

în care;

n - numărul de replici,

y_r - valoarea funcției de răspuns pentru fiecare replică.

Dacă se admite aprioric că rezultatele obținute pentru funcțiile de răspuns se supun unei legi de distribuție normală, se pot calcula valorile dispersiilor acestor funcții;

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (y_r - \bar{y})^2 \quad (5.20)$$

Omogenitatea dispersiilor a fost verificată cu ajutorul testului Cochran, care are la bază raportul dintre dispersia maximă a ansamblului de probe și suma tuturor dispersiilor din acest ansamblu :

$$G_c = \frac{\text{Max } S_i^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (5.21)$$

în care; $\text{Max } S_i^2$ - reprezintă valoarea maximă din șirul de dispersii calculate pentru cele $i=1,2,\dots,N$ experimente.

Condiția de acceptare a ipotezei nule este :

$$G_c < G_T \quad (5.22)$$

unde: G_T este valoarea critică extrasă din tabele în raport de numărul selecțiilor k , numărul gradelor de libertate (ν) și gradul de semnificație (α).

Pentru $k = N = 8$; $\nu = n-1 = 2$ și $\alpha = 5\%$ se găsește valoarea critică a lui G /107/ :

$$G_T = 0,5157$$

Valorile calculate cu ajutorul relațiilor 5.19, 5.20, 5.21 precum și verificarea omogenității dispersiilor cu relația 5.22..se prezintă pentru funcțiile de răspuns în tabela 5.13.

În cadrul acestui tabel se prezintă și valoarea dispersiei erorii experimentale, dispersie ce va fi necesară pentru estimarea pragului de semnificație a coeficienților de regresie. Calcularea valorii acesteia s-a efectuat cu relația :

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (5.23)$$

NR. EXP.	D _{im} [μm]		D _{em} [μm]		D _{im} [μm]		D _{em} [μm]		D _i [μm]		D _e [μm]		σ
	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	
1	380	1674,99	71,66	508,33	280	1074,99	65	225	330	1356,25	68,33	352,08	0,5157
2	261,66	1408,33	141,66	108,33	245	1674,99	118,33	233,33	253,33	1527,08	130	131,25	
3	340	324,99	110	100	250	1574,99	100	100	295	774,99	105	100	
4	375	2279,99	162,33	386,33	288,33	1408,33	135,66	1016,33	331,66	1808,33	149	637,75	
5	388,33	2033,33	112,33	116,33	258,33	308,33	103	47,99	323,33	977,08	107,66	102,08	
6	310	324,99	101,66	133,33	255	174,99	87,33	121,33	288,33	352,08	94,5	126,99	
7	330	1225	94	602,99	259	1167,99	89	552,99	294,50	1028,24	91,5	573,25	
8	456,66	2058,33	169,66	136,33	340,66	66,33	141,33	121,33	393,66	739,33	155,5	108,25	
Σ S ²	11329,95		2151,97		7450,94		2418,30		8563,13		2130,65		
\bar{S}^2	1416,24		268,99		931,36		302,28		1070,39		266,33		
G	0,2012		0,2802		0,2248		0,4202		0,2111		0,2988		

Tab. 5.13. Valorile medii, dispersiile și verificarea omogenității dispersiilor funcțiilor de răspuns.

NR. EXP.	AF _{ci} [μm]		AF _{ce} [μm]		AF _l [μm]		T _i [μm]		T _e [μm]		Z _p [μs]		T ₀
	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	\bar{y}	S ²	
1	50	18,75	3,33	14,58	140,17	1155,39	100	75	6,66	58,33	58,33	908,33	0,5157
2	8,33	14,58	11,66	39,58	61	253,31	16,66	58,33	23,33	158,33	5	0	
3	45	174,99	5	0	95	81,25	90	699,95	10	0	11,65	8,33	
4	43,33	33,33	13,33	64,58	91,33	740,64	86,66	133,33	26,66	253,33	5	0	
5	65	193,75	4,6	9,73	107,83	408,33	130	775	9,20	38,92	85	900	
6	27,50	131,25	7,17	0,33	96,92	24,14	55	525	14,33	1,33	5	8,33	
7	35,50	168,25	3	4	101,50	21,44	71	673	6	16	13,32	0	
8	58	715,75	14,17	20,58	117,17	136,87	116	2863	28,33	82,33	5	8,33	
IS ²	1450,65		153,38		2821,39		5802,60		613,59		1824,99		T ₀
\bar{S}^2	181,33		19,17		352,67		725,32		76,69		456,25		
G _c	0,4933		0,4210		0,4095		0,4933		0,4210		0,4977		

Tab. 5.13 (continuare) Valorile medii , dispersiile și verificarea omogenității dispersiilor funcțiilor de răspuns.

5.3.3.2. Calculul coeficienților de regresie

Modelul polinomial adoptat pentru funcțiile de răspuns considerate (rel.5.15) are forma :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5.24)$$

Estimațiile coeficienților de regresie pentru ecuația 5.24 se pot calcula prin metoda celor mai mici pătrate. Experimentul factorial beneficiază de proprietatea de ortogonalitate, proprietate ce asigură estimarea independentă a coeficienților modelului, deoarece estimațiile de cel mai mic pătrat ale coeficienților sînt funcții ortogonale de observații.

Datorită ortogonalității fiecare coeficient b_i poate fi calculat separat, ca și cum această constantă ar fi singura care este estimată din datele produse de programul de experimentare.

Termenii de ordinul 2 și superior, conținuți în model, servesc atât pentru recunoașterea unor eventuale interacțiuni ale variabilelor independente cît și pentru evaluarea erorii experimentale.

Datorită ortogonalității experimentului, pentru calculul coeficienților de regresie se utilizează coloanele matricii de experimentare cu valori codificate (tab.5.12)

Expresiile de calcul ale acestor coeficienți sînt:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u \quad (5.25)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (X_i X_j)_u \bar{Y}_u \quad (5.26)$$

$$b_{ijk} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (X_i X_j X_k)_u \bar{Y}_u \quad (5.27)$$

în care $i \neq j \neq k = 1, 2, 3, \dots$ reprezintă numărul de ordine al variabilelor independente introduse la valoarea lor codificată X ,

ar \bar{y} este media funcției de răspuns calculată cu rel.5.19.

Valorile calculate ale coeficienților de regresie sînt prezentate, pentru toate funcțiile de răspuns analizate, în tab.5.14.

5.3.3.3. Testarea semnificației coeficienților de regresie

Pentru ca estimațiile coeficienților de regresie calculați să fie semnificative este necesar ca valorile acestora să depășească o valoare critică de semnificație dată de relația:

$$b_n > S_b \cdot t_T \quad (5.28)$$

în care: S_b - abaterea pătratică standard a estimațiilor coeficienților de regresie determinată cu relația :

$$S_b = \left(\frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{n \cdot N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.29)$$

t_T - este valoarea dată tabelar /21/ a unei variabile aleatoare cu distribuție de repartiție cunoscută (repartiția t sau Student) cu care se testează semnificația coeficienților, funcție de pragul de semnificație acceptat (α) și numărul de grade de libertate. Pentru $\alpha = 5\%$ și $\nu = N(n-1) = 16$ se extrage din tabel valoarea :

$$t_T = 2,120$$

Valorile calculate pentru produsul $S_b \cdot t_T$ sînt prezentate în tabelul 5.14, coeficienții de regresie semnificativi fiind subliniați.

Valorile coeficienților de regresie ne oferă o apreciere cantitativă a influenței variabilei respective asupra funcției de răspuns considerate. Valorile relative mai mari indică o influență mai pronunțată iar semnul acestora indică sensul influenței (direct sau invers proporțional).

5.3.3.4. Verificarea adecvantei modelului matematic

Stabilind valorile coeficienților de regresie și reținînd doar pe cei a căror valoare depășește pragul de semnificație determinat pentru fiecare funcție de răspuns (tab.5.14), se pot scrie,

	Dim	Dim	Dem	Dem	Di	De	AFci	AFce	AFI	Ti	Te	δp
b0	355,20*	272,04*	120,41*	104,95*	313,73*	112,69*	41,58*	7,78*	101,36*	83,16*	15,56*	23,53*
b1	-4,37	10,20	23,41*	15,70*	2,98	19,56*	7,29*	3,80*	-9,76	-14,58	7,60*	-21,03*
b2	20,20*	12,45	13,58*	11,54*	14,92*	12,56*	3,87	1,09	-0,12	7,74	2,18	-14,79*
b3	16,04	6,20	-1,00	0,21	11,25	-0,39	4,92	-0,55	4,51	9,84	-1,09	3,54
b12	44,79*	19,79*	8,58*	6,29	30,93*	7,44*	12,50*	1,07	12,76*	25,00*	2,14	14,79*
b13	16,45*	9,37	7,06	-6,54	13,02	-6,85	3,54	-0,37	10,95*	7,08	-0,72	-3,54
b23	1,87	9,12	-1,16	-1,54	4,14	-1,35	-3,62	0,26	3,59	-7,24	0,52	-3,12
b123	6,45	1,46	13,00*	10,70*	2,60	11,85*	2,50	1,07	-6,11	5,00	2,14	3,12
Sb	7,68	6,23	3,347	3,549	6,679	3,331	2,749	0,893	3,833	5,498	1,787	4,360
Sb t T	16,28	13,21	7,09	7,53	14,16	7,06	5,82	1,89	8,13	11,64	3,79	9,24
SIMBOLIZARE	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9	y10	y11	y12

Tab. 5.14. Valorile coeficienților de regresie ai funcțiilor de răspuns.

sub formă polinomială, pornind de la ecuația 5.24, modelele matematice ale criteriilor de performanță privind precizia prelucrării cu laser a oțelului 20Cr13o:

$$D_{iM} = y_1 = 355,2 + 20,2 x_2 + 44,79 x_1 x_2 + 16,45 x_1 x_3 \quad (5.30)$$

$$D_{im} = y_2 = 272,04 + 12,45^* x_2 + 19,79 x_1 x_2 \quad (5.31)$$

$$D_{eM} = y_3 = 120,41 + 23,41 x_1 + 13,58 x_2 + 8,51 x_1 x_2 + 13 x_1 x_2 x_3 \quad (5.32)$$

$$D_{em} = y_4 = 104,95 + 15,7 x_1 + 11,54 x_2 + 10,7 x_1 x_2 x_3 \quad (5.33)$$

$$D_i = y_5 = 313,73 + 14,98 x_2 + 30,93 x_1 x_2 \quad (5.34)$$

$$D_e = y_6 = 112,69 + 19,56 x_1 + 12,56 x_2 + 7,44 x_1 x_2 + 11,85 x_1 x_2 x_3 \quad (5.35)$$

$$AF_{c_i} = y_7 = 41,58 - 7,29 x_1 + 12,5 x_1 x_2 \quad (5.36)$$

$$AF_{c_e} = y_8 = 7,78 + 3,8 x_1 \quad (5.37)$$

$$AF_l = y_9 = 101,36 - 9,76 x_1 + 12,76 x_1 x_2 + 10,95 x_1 x_2 \quad (5.38)$$

$$T_i = y_{10} = 83,16 - 14,58 x_1 + 25 x_1 x_2 \quad (5.39)$$

$$T_e = y_{11} = 15,56 + 7,6 x_1 \quad (5.40)$$

$$Z_p = y_{12} = 23,53 - 21,03 x_1 - 14,79 x_2 + 14,79 x_1 x_2 \quad (5.41)$$

* Au fost considerați, pentru a descrie cât mai aproape de realitate dependența matematică a funcției de răspuns față de variabilele independente, și coeficienții care nu depășesc în valoare nivelul de semnificație dar sînt foarte aproape de acesta.

Verificarea adecvantei modelelor matematice elaborate se face cu ajutorul testului Fischer prin care se stabilește dacă diferența observată între dispersii este reală sau întâmplătoare.

Valoarea calculată a testului F se determină cu relația

$$F_c = \frac{S_{dd}^2}{\bar{S}^2} \quad (5.42)$$

în care:

$$S_{dd}^2 = \frac{n \cdot \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2}{\nu_1} \quad (5.43)$$

și reprezintă dispersia abaterilor modelului față de valoarea medie a funcției de răspuns;

\bar{S}^2 - dispersia erorii experimentale (tab.5.13).

În relația (5.43) s-au notat :

\hat{y}_u - valoarea funcției de răspuns dată de modelul matematic,

\bar{y}_u - valoarea medie a funcției de răspuns la experimentul u ,

$\nu_1 = N-k$ - numărul gradelor de libertate,

k - numărul coeficienților de regresie semnificativi (inclusiv b_0).

Valorile calculate ale lui F_c sînt prezentate în tabelul 5.15.

Valoarea tabulată a lui F se alege în funcție de numărul gradelor de libertate: $\nu_1 = N-k$; $\nu_2 = N(n-1)$ și gradul de semnificație α .

Pentru o probabilitate de 95 % și numărul gradelor de libertate ν_1 și ν_2 calculate în tab.5.15 se aleg din /21/ valorile lui F_T redată în tab.5.15.

Modelul matematic determinat se consideră adecvat dacă este îndeplinită condiția

$$F_c \leq F_T \quad (5.44)$$

Se observă că pentru toate funcțiile de răspuns ale căror modele matematice sînt redată prin ecuațiile 5.30 - 5.41, condiția 5.44 este îndeplinită.

FUNCTIA DE RĂSPUNS.	ELEMENTELE DE CALCUL						F _c	* F _T
	ν_1	ν_2	$\Sigma (\bar{y}-\hat{y})^2$	$n \Sigma (\bar{y}-\hat{y})^2$	S_{ad}^2	\bar{S}^2		
D _{iM}	4	16	2590,36	7771,08	1942,77	1416,24	1,37	3,01
D _{im}	5	16	1694,50	5083,50	1016,70	931,36	1,09	2,85
D _{eM}	3	16	429,87	1289,61	429,87	268,99	1,59	3,24
D _{em}	4	16	678,26	2034,78	508,69	302,28	1,68	3,01
D _i	5	16	2629,78	7889,32	1577,86	1070,39	1,47	2,85
D _e	3	16	391,69	1175,08	391,65	266,33	1,47	3,24
AF _{ci}	5	16	569,08	1707,24	341,45	181,33	1,88	2,85
AF _{ce}	6	16	32,05	96,19	16,03	19,17	0,84	2,74
AF _l	4	16	562,12	1686,36	421,59	352,67	1,19	3,01
T _i	5	16	2276,32	6828,96	1365,80	725,32	1,87	2,85
T _e	6	16	128,14	384,41	64,10	76,69	0,83	2,74
ζ_p	4	16	406,71	1220,13	305,03	456,25	0,67	3,01

* Valorile lui Fr s-au considerat pentru o probabilitate de: P=95%

Tab. 5.15. Verificarea adecvantei modelului matematic.

5.4. Analiza rezultatelor obținute prin modelare matematică

Prin analiza ecuațiilor 5.30 - 5.41 sau a valorilor algebrice ale coeficienților de regresie din tab.5.10 se poate observa că asupra preciziei de dimensiune și de formă geometrică influențează aproape în toate cazurile, cu pondere însemnată, energia fasciculului laser exprimată prin valoarea tensiunii de încărcare a condensatorilor.

Precizia de dimensiune și durata prelucrării este influențată

de asemenea de mărimea diametrului diafragmei. Ovalitatea orificiului, atât la intrare cât și la ieșire, este influențată într-o măsură mai mică de diametrul diafragmei. Influența diametrului diafragmei asupra conicității poate fi considerată ca neglijabilă ($- 0,115 < 8,13$)

Distanța focală a sistemului de focalizare ca variabilă independentă individuală nu are o influență semnificativă asupra nici unei funcții de răspuns. Valoarea coeficientului b_3 apropiindu-se de pragul de semnificație doar pentru $Di(Di_M)$ AFC_1 și AF_1 . Dacă influența mai pronunțată a acesteia asupra diametrului de intrare maxim Di_M și implicit asupra ovalității, poate fi pusă și pe seama dificultăților privind măsurarea cu exactitate a diametrului maxim al găurii la intrarea fasciculului, nu același lucru se poate afirma atunci când analizăm conicitatea AF_1 .

Deși nesemnificativ ($4,51 < 8,13$) se observă totuși că distanța focală a obiectivului determină o variație direct proporțională a mărimei conicității, fenomen ce devine mai accentuat, probabil, pentru grosimi mai mari de material.

Coeficienții de regresie ce definesc interacțiunile sînt semnificativi sau aproape de pragul de semnificație pentru interacțiunea de ordinul unu U-D (tensiune-diametrul diafragmei) la aproape toate funcțiile de răspuns deoarece una, sau ambele variabile (U,D) sînt semnificative.

Interacțiunea U-f (tensiune-distanță focală) este semnificativă doar pentru Di_M și AF_1 .

Interacțiunea de ordinul doi U-D-f este semnificativă doar pentru dimensiunile orificiului la intrarea fasciculului în material.

Analizînd semnul coeficienților de regresie, se constată că în marea lor majoritate variabilele independente determină o variație direct proporțională a valorilor funcțiilor de răspuns.

O variație semnificativă invers proporțională determină doar tensiunea de încărcare a condensatorilor pentru AFC_1 , AF_1 , T_1 și ζ_p și diametrul diafragmei pentru durata prelucrării ζ_p .

Dacă se pornește din centrul domeniului de experimentare, acolo unde variabilele au valoarea nivelului de bază (valori codificate nule) iar funcțiile de răspuns au valori estimate prin coeficientul medie b_0 , se pot studia influențele separate ale variabilelor independente.

Menținînd o parte din variabile la valoarea coeficientă nulă

FUNCȚIA DE RĂSPUNS	ECUAȚIA MODELULUI MATEMATIC	PARAMETRU CONSTANT	x_{js}	$Y(X_{js})$	x_{ij}	$Y(X_{ij})$	t_{ij}	n	ECUAȚIA DE REGRESIE PARȚIALĂ
D _I	$Y_5 = 313,75 + 2,98 x_1 + 14,98 x_2 + 30,93 x_1 x_2$	$X_2 = 0$	3000	316,73	2200	310,77	0,0074	294,38	$D_I = 0,0074 U + 294,38$
		$X_1 = 0$	10	328,73	6	298,77	7,49	253,83	$D_I = 7,49 D + 253,83$
		$X_2 = +1$	3000	362,64	2200	294,82	0,0847	108,31	$D_I = 0,0847 U + 108,31$
		$X_2 = -1$	3000	270,82	2200	320,72	-0,0698	480,44	$D_I = -0,0698 U + 480,44$
		$X_1 = +1$	10	362,64	6	270,82	22,955	133,09	$D_I = 22,955 D + 133,09$
		$X_1 = -1$	10	294,82	6	320,72	-7,975	374,57	$D_I = -7,975 D + 374,57$
D _e	$Y_6 = 112,69 + 19,56 x_1 + 12,56 x_2 + 7,44 x_1 x_2 + 11,85 x_1 x_2 x_3$	$X_2 = 0$	3000	132,25	2200	93,13	0,0489	-14,45	$D_e = 0,0489 U - 14,45$
		$X_1 = 0$	10	125,25	6	100,13	6,28	62,45	$D_e = 6,28 D + 62,45$
		$X_2 = +1$	3000	152,25	2200	134,25	0,0675	-50,25	$D_e = 0,0675 U - 50,25$
		$X_2 = -1$	3000	112,25	2200	118,01	0,0303	21,35	$D_e = 0,0303 U + 21,35$
		$X_1 = +1$	10	152,25	6	113,25	10,00	52,25	$D_e = 10,00 D + 52,25$
		$X_1 = -1$	10	98,25	6	88,01	2,56	76,65	$D_e = 2,56 D + 76,65$
		$X_2 = +1$	3000	164,10	2200	80,60	0,0971	-127,27	$D_e = 0,0971 U - 127,27$
		$X_2 = -1$	3000	100,40	2200	90,80	0,0006	98,37	$D_e = 0,0006 U + 98,37$
		$X_1 = +1$	10	164,10	6	100,40	15,925	4,85	$D_e = 15,925 D + 4,85$
		$X_1 = -1$	10	86,40	6	90,80	-3,365	120,05	$D_e = -3,365 D + 120,05$
		$X_2 = +1$	3000	140,40	2200	110,10	0,0378	26,77	$D_e = 0,0378 U + 26,77$
		$X_2 = -1$	3000	126,10	2200	70,10	0,0599	-55,67	$D_e = 0,0599 U - 55,67$
		$X_1 = +1$	10	140,40	6	100,10	4,075	99,65	$D_e = 4,075 D + 99,65$
		$X_1 = -1$	10	110,10	6	80,10	8,685	25,25	$D_e = 8,685 D + 25,25$

Tab. 5.11. Determinarea ecuațiilor de regresii parțiale experimentale pentru D_I și D_e

și acordând valori la limitele domeniului de experimentare (± 1) celorlalte, se pot determina ecuațiile de regresie parțiale cu ajutorul cărora se pot determina, prin interpolare, orice valori în interiorul domeniului.

Pentru separarea influenței tensiunii de încărcare a condensatorilor s-a considerat doar $x_1 \neq 0$, celelalte variabile fiind considerate la nivelul de bază și s-a calculat funcția :

$$y(x_1) = f(x_{i0}) \pm \beta_1 \approx b_0 + b_1 \quad (5.45)$$

S-au separat apoi succesiv, ceilalți factori calculând :

$$y(x_1, x_i) = f(x_{i0}) \pm \beta_1 + \beta_i x_i + \beta_{1i} x_1 x_i \approx b_0 \pm b_1 + b_i x_i + b_{1i} x_1 x_i \quad (5.46)$$

pentru $i = 1, 2, 3$.

S-au determinat valorile funcțiilor de răspuns la limitele codificate ale variabilelor (+1, -1) și s-a trecut apoi la valori naturale, determinând ecuațiile de regresie parțiale experimentale pentru care s-a calculat coeficientul unghiular și ordonata la origine. Modalitatea de efectuare practică a acestor calcule reiese din tab.5.16 unde se prezintă ecuațiile de regresie parțiale pentru două din funcțiile de răspuns.

În mod similar s-au determinat ecuațiile de regresie parțiale experimentale pentru celelalte funcții de răspuns:

$$D_{iM} = 10,1 D + 274,4 = 1,0693 f + 307,08 \quad (\text{la } U = 2600 \text{ V}),$$

$$D_{iM} = 32,295 D + 9524 = 2,0993 f + 261,73 \quad (\text{la } U = 3000 \text{ V}),$$

$$D_{iM} = -12,295 D + 453,56 = -0,0273 f + 356,43 \quad (\text{la } U = 2200 \text{ V}),$$

(5.47)

$$D_{im} = 0,0255 U + 205,74 = 6,225 D + 222,24,$$

$$D_{eM} = 0,0585 U - 31,75 = 6,79 D + 66,09,$$

$$D_{em} = 0,0392 U - 2,9 = 5,77 D + 58,79$$

$$AF_{c_i} = -0,0182 U + 88,96 = 1,92 D + 26,222,$$

$$AF_{c_e} = 0,0096 U - 16,92,$$

$$AF_l = -0,0244 U + 164,8 = 0,3006 f + 87,83 \text{ (la } D = 8 \text{ mm)}$$

$$AF_l = 0,0075 U + 81,86 = 2,0514 f + 0,29 \text{ (la } D = 10 \text{ mm)},$$

$$AF_l = -0,0563 U + 247,74 = 0,3006 f + 87,83 \text{ (la } D = 6 \text{ mm)},$$

$$T_i = -0,0364 U + 177,93 = 3,87 D + 52,2,$$

$$T_e = 0,019 U - 33,84,$$

$$\zeta_p = -0,0525 U + 160,225 = -7,395 D + 82,69$$

In mod similar se scriu ecuațiile de regresie parțiale experimentale pentru nivelul superior și inferior al variabilelor, ecuații redată în tab.5.12 pentru D_i și D_e ; pentru celelalte funcții de răspuns; din economie de spațiu, ele au fost redată doar grafic.

Ponderea de influență a diferiților factori x_i s-a putut studia urmărindu-se reprezentarea grafică a modelelor matematice prin care s-au separat influențele: fig. 5.7 - 5.17.

Privind precizia dimensională a orificiilor exprimată prin valorile diametrelor maxime, minime și medii la intrarea și ieșirea fasciculului laser precum și prin toleranța acestor dimensiuni se pot constata cele ce urmează:

Diametrul de intrare maxim depinde de toți cei trei parametri considerați pentru procesul de prelucrare (U , D și f). Astfel, la tensiuni ale condensatorilor reduse valoarea $D_{i_{in}}$ scade odată cu creșterea diametrului diafragmei (fig.5.7 e) iar la tensiuni mari (2.600 și 3.000 V) se constată o creștere a valorii lui $D_{i_{in}}$ odată cu mărirea diametrului diafragmei (fig.5.7 a,c). Domeniul de împrăștiere al valorilor acestui diametru scade treptat de la tensiunea de 3000 V la cea de 2200 V, unde se observă că, indiferent de distanța focală a obiectivului, se obține aceeași variație.

$$y_1 = 355,2 + 20,2 x_2 + 16,04 x_3 + 44,79 x_1 x_2 + 16,45 x_1 x_3$$

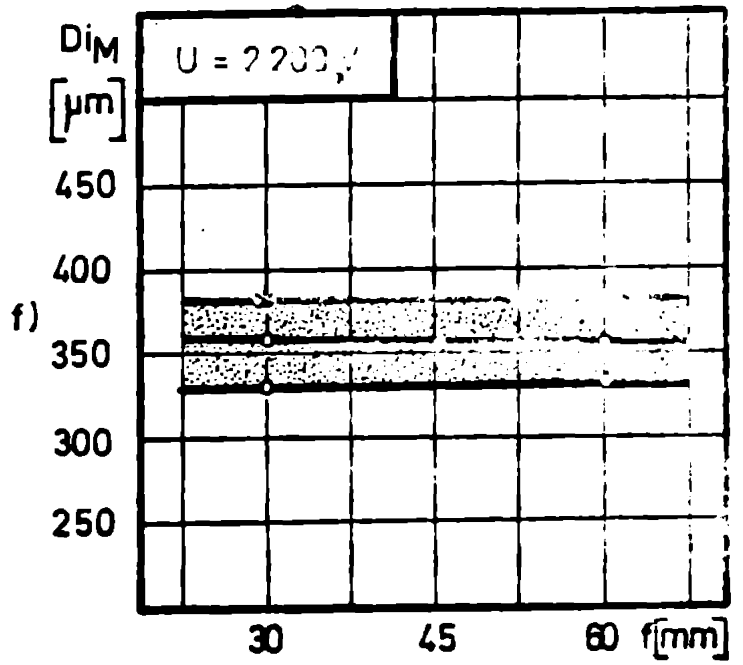
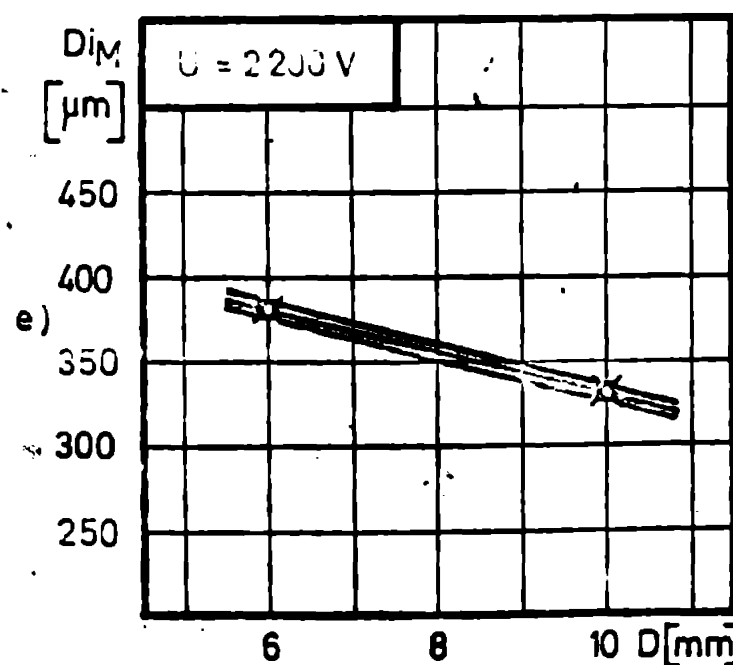
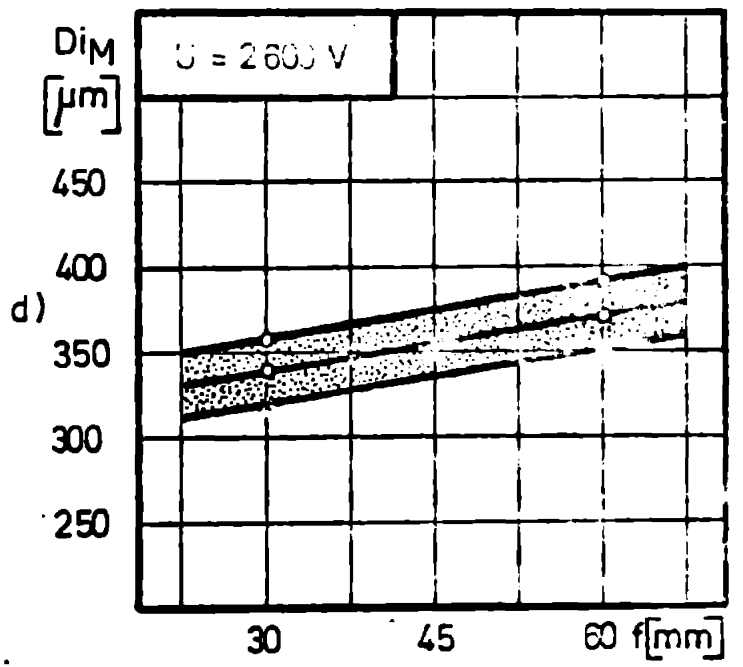
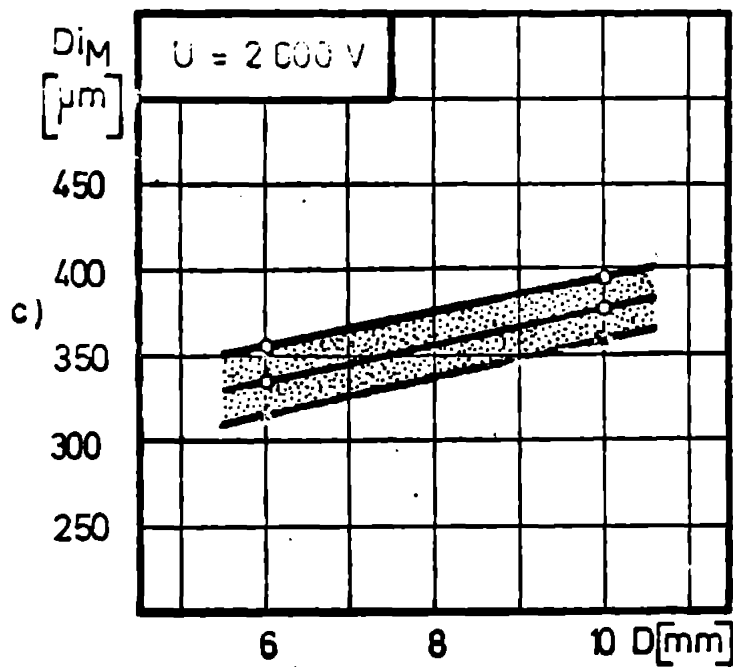
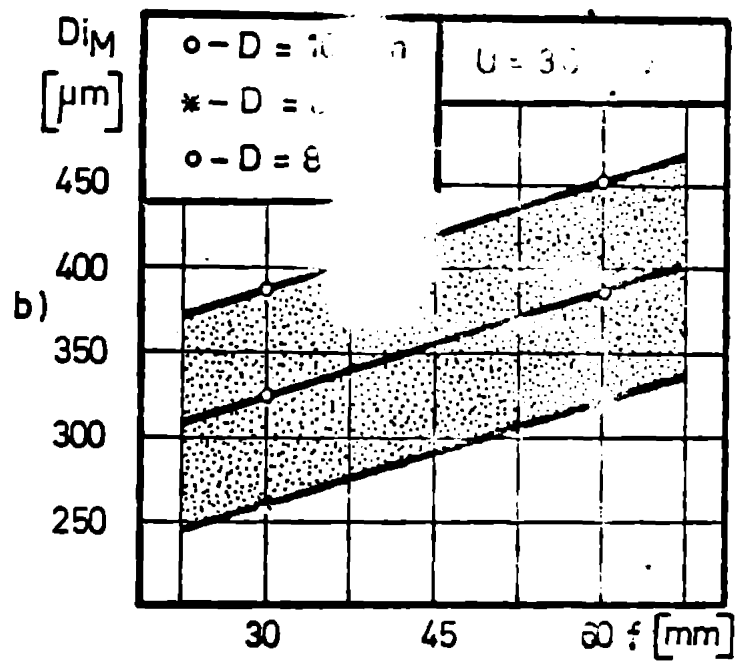
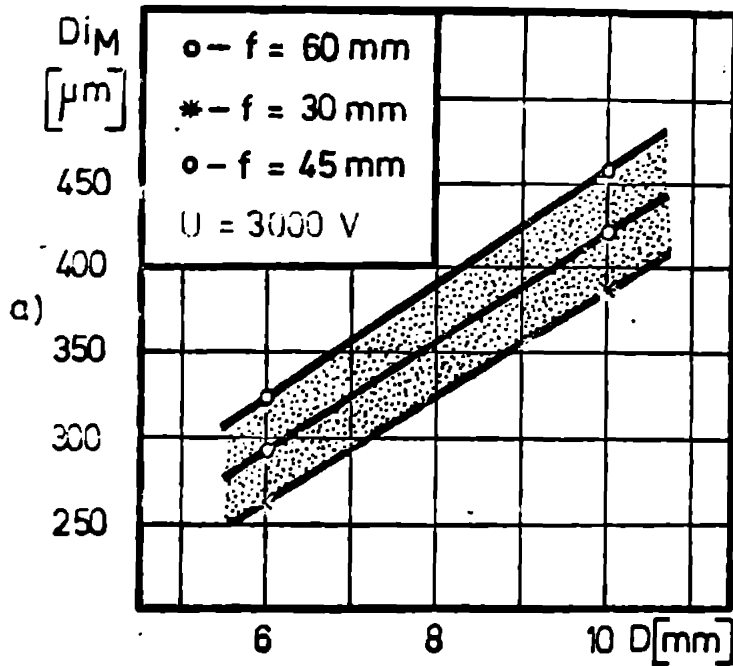
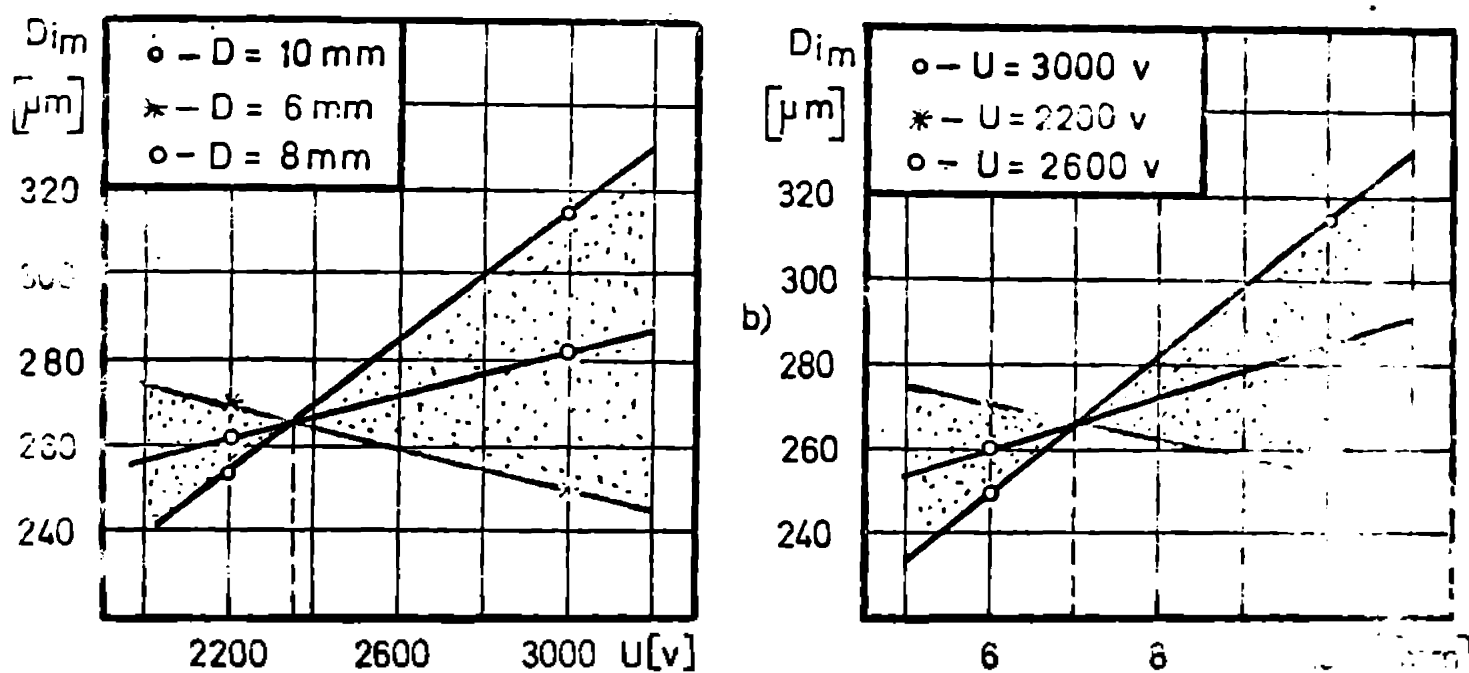


Fig. 5.7. Reprezentarea ecuațiilor de regresie parțiale pentru Di_M



Analizând variația lui Di_m în raport cu distanța focală a obiectivului (fig.5.7 b,d,f), se constată o creștere a valorii acestuia odată cu creșterea lui f , creștere ce devine neesențială la tensiuni de 2200 V; domeniul de împrăștiere avînd un maxim pentru tensiuni cuprinse între 2.200 și 2.600 V. (poziția curbelor inversează fig.5.7 d,f). Valori minime ale acestui diametru apar și deci pentru tensiuni de încărcare a condensatorilor de cca (2200 V) atunci cînd, mărimea diafragmei și a distanței focale au un rol mai puțin determinant. Desigur acest lucru presupune un număr mai mare de impulsuri în vederea străpungerii materialului și deci o creștere a duratei de prelucrare.

Diametrul de intrare minim Di_m (fig.5.8) are valori minime pentru tensiuni mari și diafragme mici (fig.5.8.a) respectiv pentru tensiuni mici și diafragme mari (fig.5.8.b). Punctele de optimizare sînt situate la valori de tensiuni de cca 2.400 V și diafragme de cca 7 mm.

Diametrul de ieșire maxim De_m (fig.5.9) crește odată cu creșterea tensiunii și respectiv a diametrului diafragmei, domeniul de împrăștiere fiind mai mic la distanțe focale de 30 mm. Pentru distanțe focale de 60 mm dreptele ce delimitează domeniile de variație sînt concurente la valori ale tensiunii de cca 2400 V, respectiv la diametrele diafragmei de cca 6 mm. Pe măsură ce crește tensiunea (fig.5.9 a,c,e) respectiv diametrul diafragmei (fig.5.9 b,d,f)

$$y_3 = 120,41 + 23,41 x_1 + 13,58 x_2 + 8,58 x_1 x_2 + 13 x_1 x_2 x_3$$

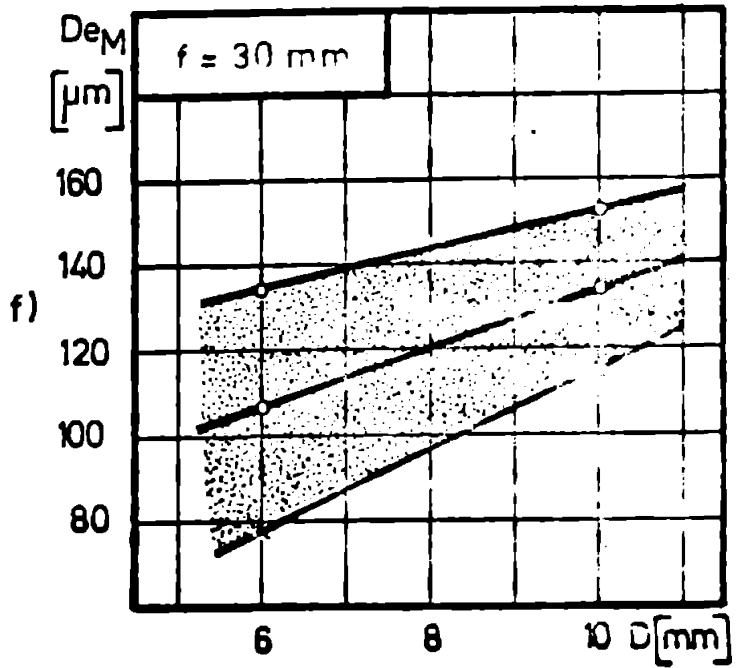
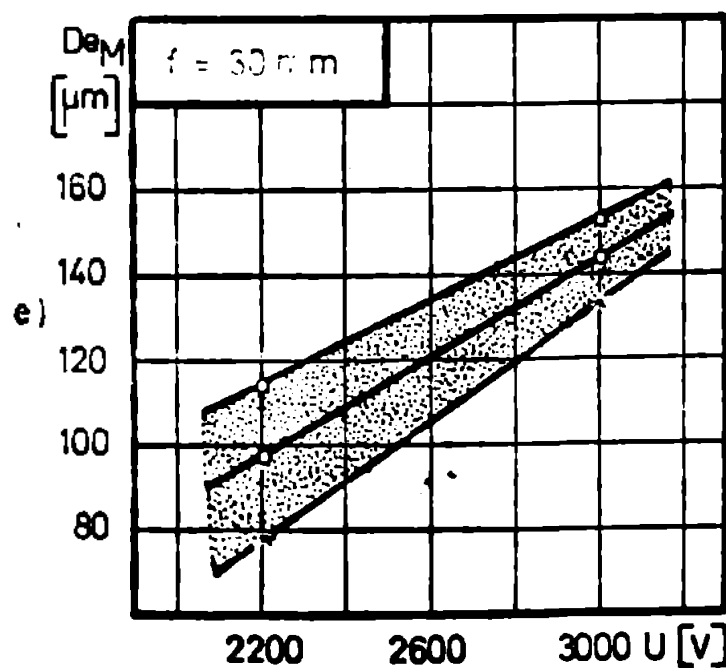
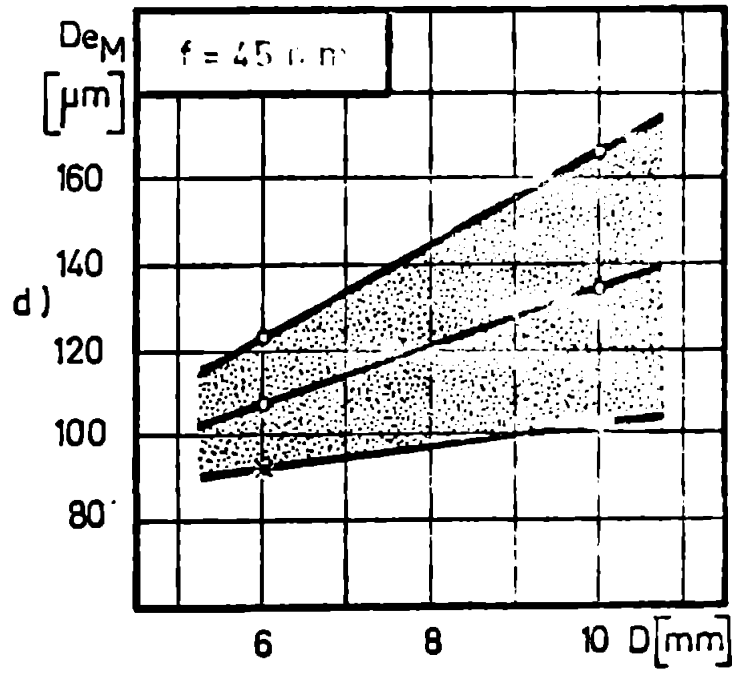
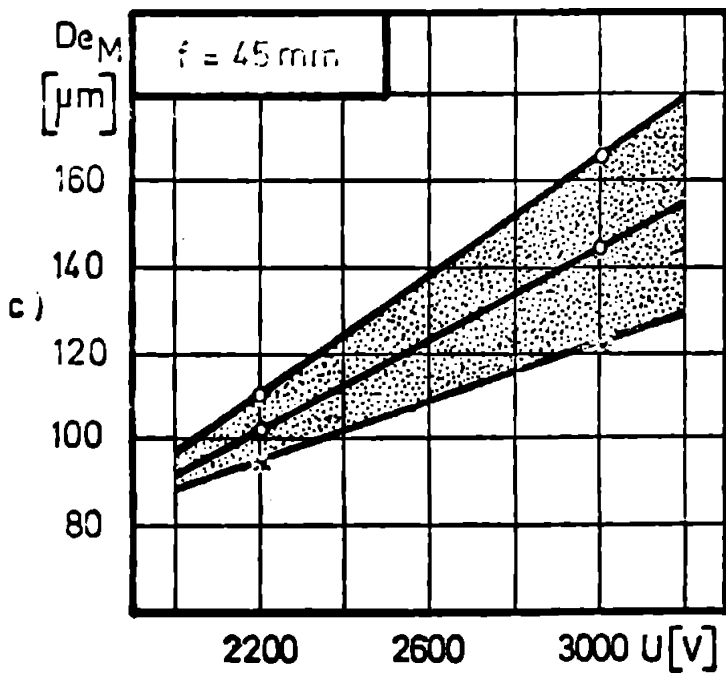
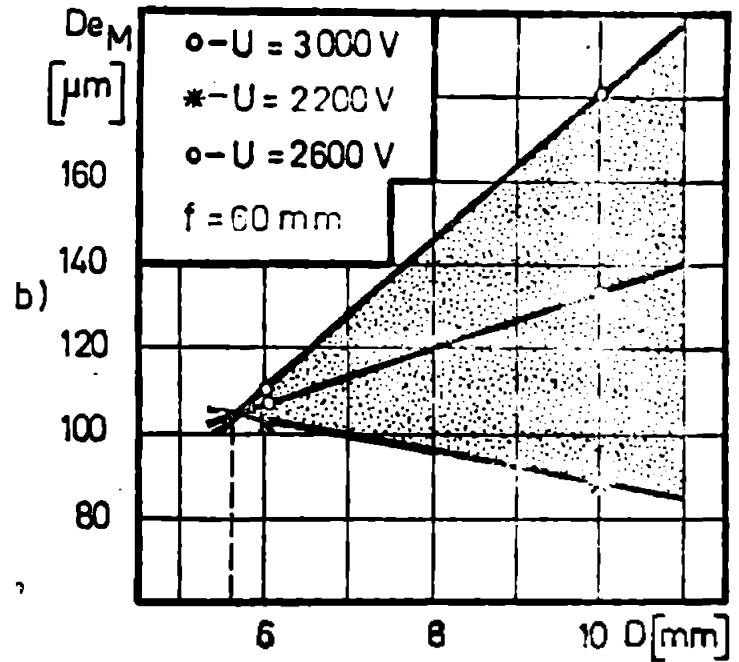
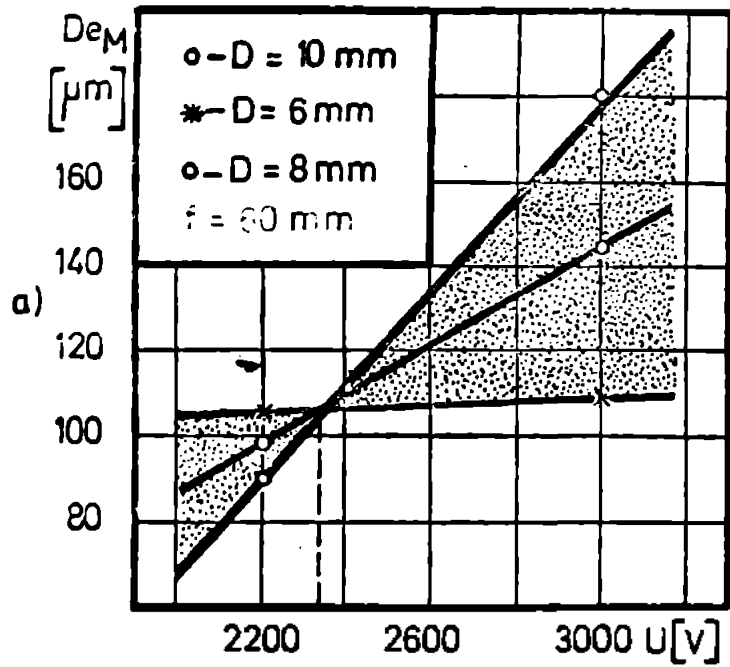


Fig. 5.9. Reprzentarea ecuațiilor de regresie parțiale pentru De_M

acest punct de intersecție se deplasează spre dreapta, adică spre valori mai mari ale variabilelor independente.

Diametrul de ieșire minim (De_m) (fig.5.10) are o variație similară cu cea a De_M , el crescînd odată cu creșterea tensiunii (fig.5.10 a,c,e) și respectiv a diametrului diafragmei (fig.5.10 b,d,f). Cîmpul de dispersie al valorilor acestui diametru se aseamănă mult cu cel al lui De_M .

Diametrul de intrare mediu (Di), definit ca diametru al orificiului la "intrarea" fasciculului laser în material variază direct proporțional cu mărimea tensiunii (fig.5.11 a) și respectiv a diafragmei (fig.5.11 b). Această variație este caracteristică procesului de găurire cu fascicul laser nediafragmat (diafragma de 10 mm fiind foarte aproape de valoarea diametrului fasciculului laser extras din instalație), respectiv utilizării radiației laser de energie mare. Creșterea tensiunii de încărcare a condensatorilor nu determină o mărire esențială a diametrului de intrare dacă în fața fasciculului se pune o diafragmă de diametru mic. Obținerea unui alezaj de diametru mai mare odată cu creșterea tensiunii și a diametrului diafragmei se consideră firească datorită faptului că prin creșterea celor doi parametri aportul energetic al laserului este mai mare. Dacă energia impulsului este redusă (tensiuni de încărcare mici) sau diametrul diafragmei are valori apropiate de diametrul nominal al fasciculului, pentru obținerea unui orificiu străpuns este necesară aplicarea unui număr mai mare de impulsuri. Se constată însă, că la un număr mai mic de impulsuri forma și dimensiunea orificiului la intrarea fasciculului laser este mai apropiată de valoarea estimată teoretic.

Diametrul de ieșire mediu (De), definit ca diametru al orificiului la "ieșirea" fasciculului laser din material depinde esențial de energia fascicului laser, de diametrul diafragmei, de distanța focală a sistemului optic precum și de interacțiunea acestor trei parametri. Se constată, din ecuațiile de regresie parțiale reprezentate grafic în fig.5.12, că apare o creștere a valorii lui De cu creșterea tensiunii (fig.5.12 a,c,e) și a diametrului diafragmei (fig.5.12 b,d,f); distanța focală a obiectivului determinînd doar o modificare a cîmpului de dispersie al acestuia.

Odată cu creșterea distanței focale cîmpul de dispersie al valorilor lui De se micșorează la tensiuni și diafragme mici și

$$y_4 = 104,95 + 15,7 x_1 + 11,54 x_2 + 6,29 x_1 x_2 + 10,7 x_1 x_2 x_3$$

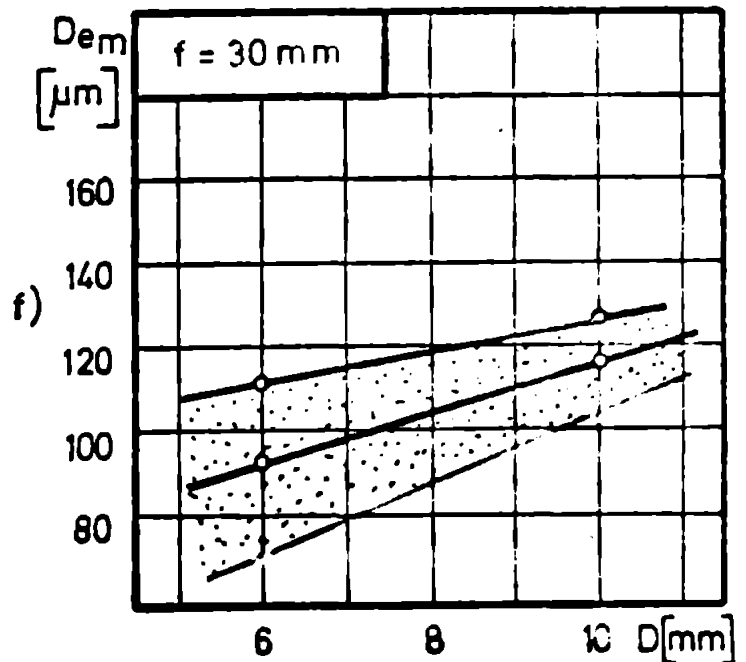
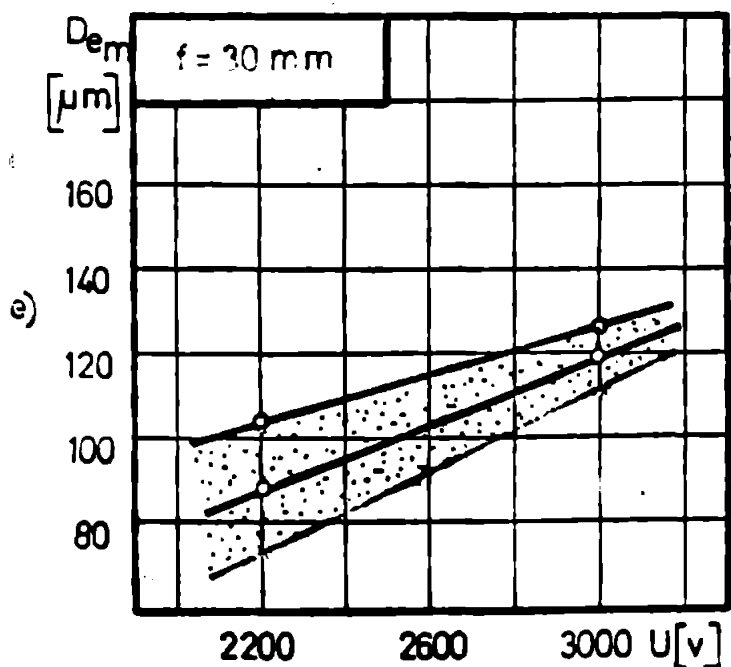
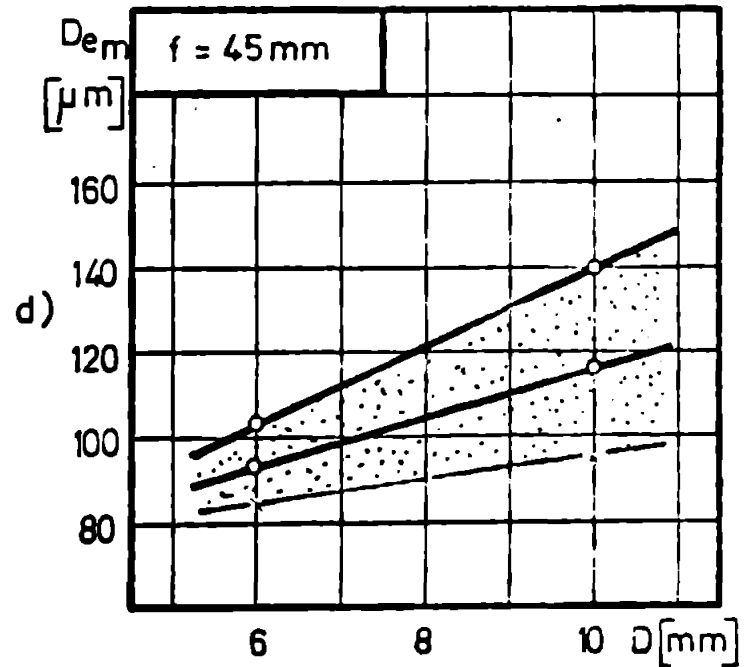
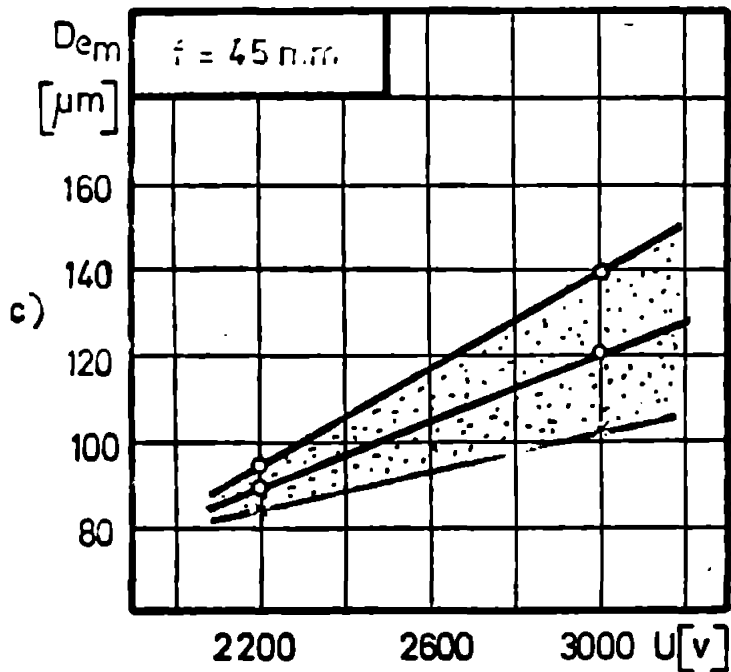
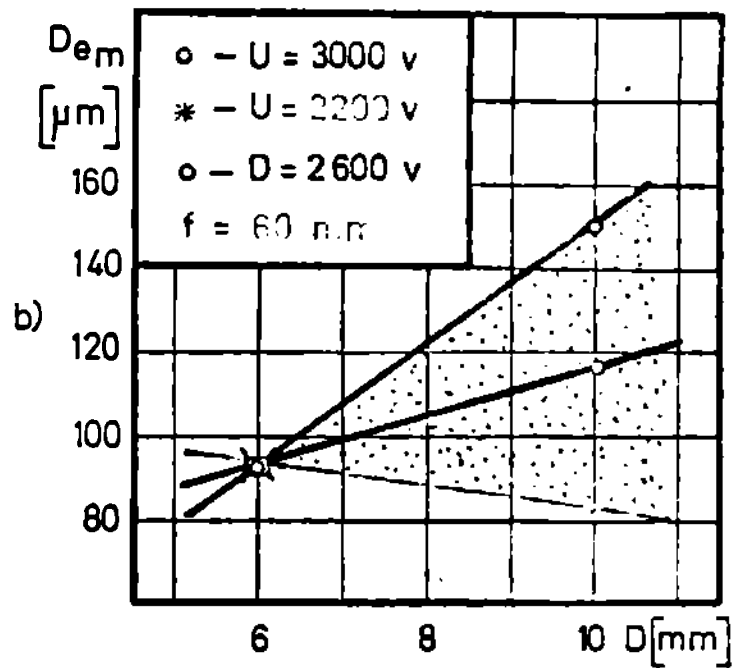
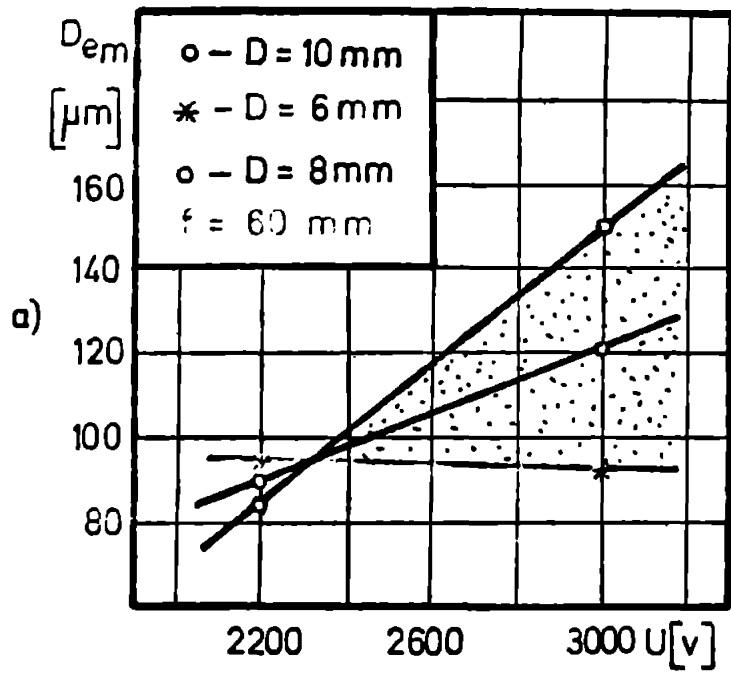


Fig. 5.10. Reprezentarea ecuațiilor de regresie parțiale pentru D_{em}

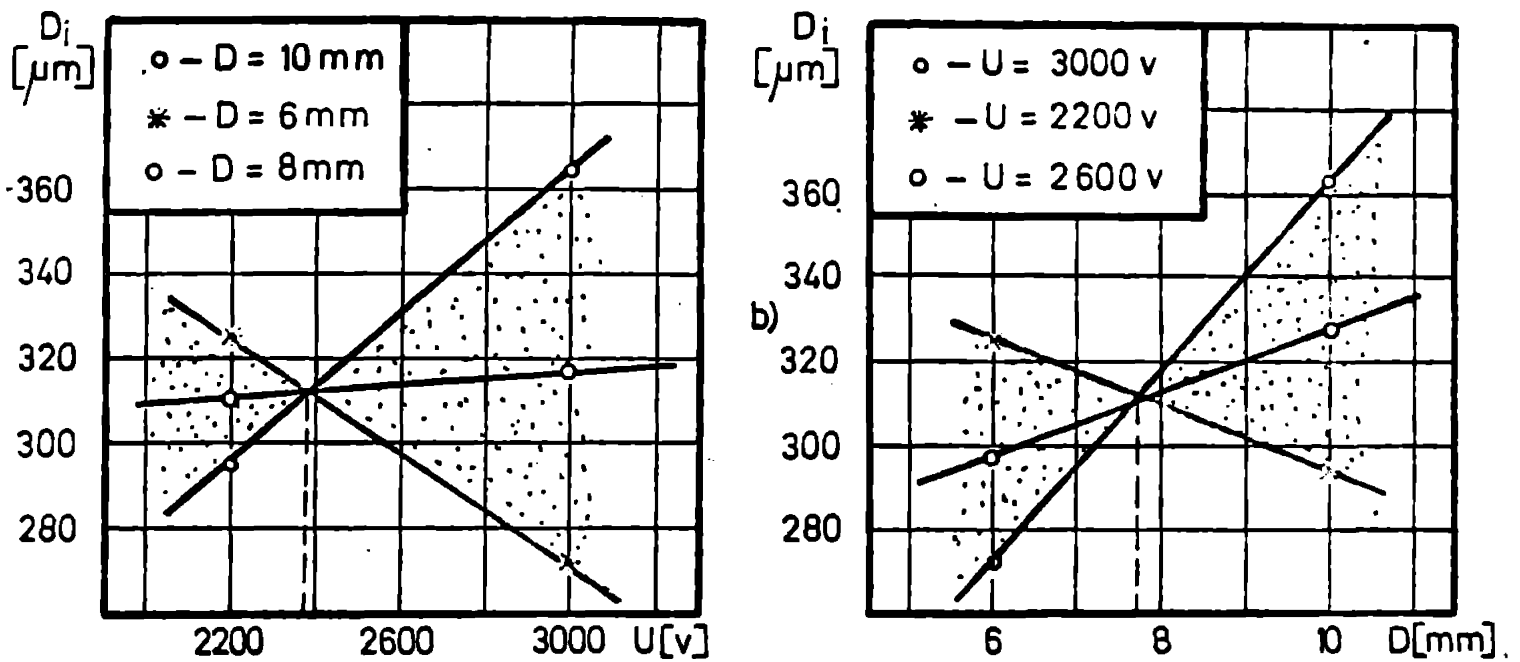


Fig. 5.11. Variația diametrului orificiului la intrarea fascicului.

crește pentru limitele superioare ale intervalului considerat pentru tensiune, respectiv diafragmă. Si pentru acest diametru, valori reduse se obțin la ^{limite} inferioară a domeniului considerat pentru variația tensiunii și diafragmei.

Abateră de la forma circulară (ovalitatea) a orificiului este influențată în mod determinant de mărimea tensiunii de încărcare a condensatorilor și de diametrul diafragmei.

Ovalitatea orificiului la intrarea fascicului laser are valori mult mai mari decât cea a orificiului de ieșire (fig.5.13, 5.14). Mărimea ovalității orificiului la intrarea fascicului AP_{c_1} (fig.5.13) crește prin mărirea tensiunii de încărcare a condensatorilor și (sau) prin mărirea diametrului diafragmei; variație ce era de așteptat atât datorită structurii multimodale a fascicului laser utilizat cât și datorită distribuției întâmplătoare a energiei acestuia în spotul focal. Se constată însă, efectul puternic pe care diametrul diafragmei îl are asupra acestui parametru. Pentru un diametru al diafragmei de 6 mm (fig.5.13 a), ovalitatea AP_{c_1} scade vertiginos odată cu creșterea tensiunii. Această micșorare este determinată atât de rolul diafragmei cât și de numărul de impulsuri necesare pentru străpungere, număr ce scade odată cu creșterea tensiunii, mai ales la valori reduse ale diafragmei. Se obține, pentru condițiile de experimentare considerate, o ovalitate minimă la tensiuni de încărcare a condensatorilor de 3.000 V și un diametru al diafragmei de 6 mm.

$$y_6 = 112,69 + 19,56 x_1 + 12,56 x_2 + 7,44 x_1 x_2 + 11,85 x_1 x_2 x_3$$

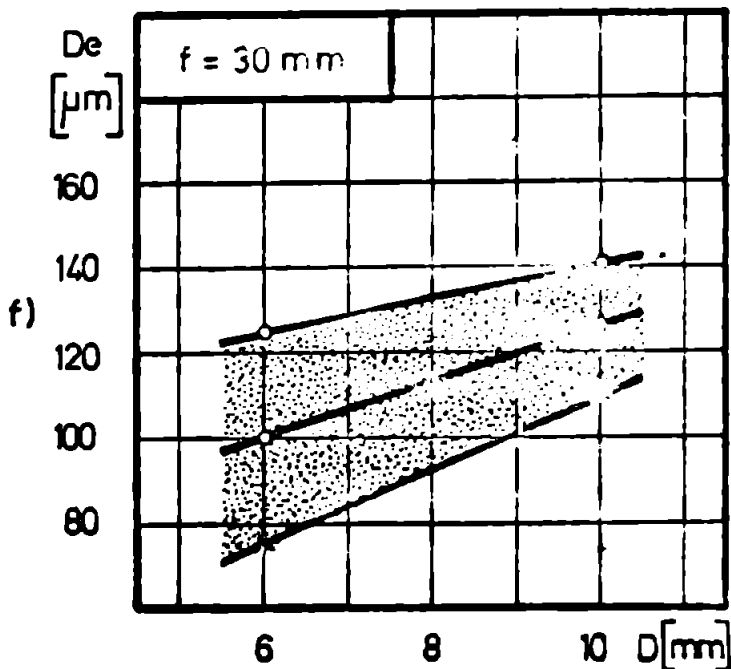
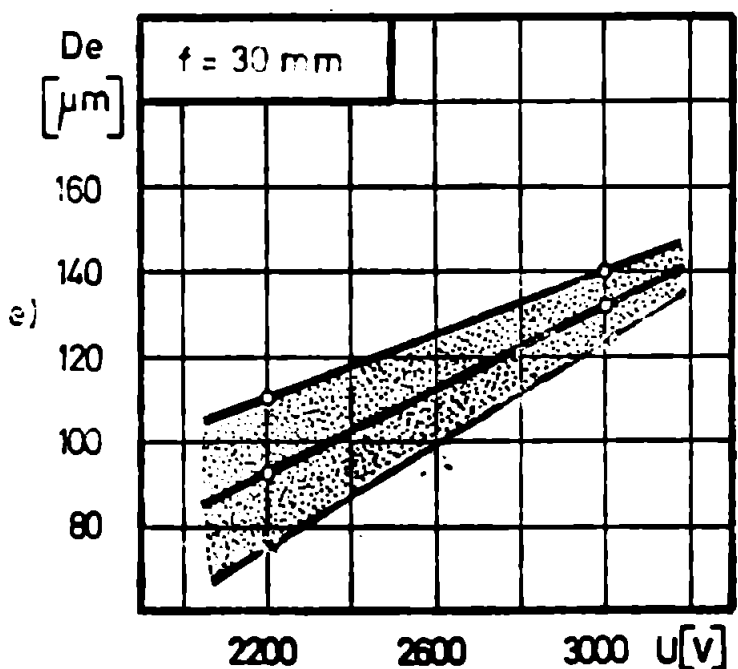
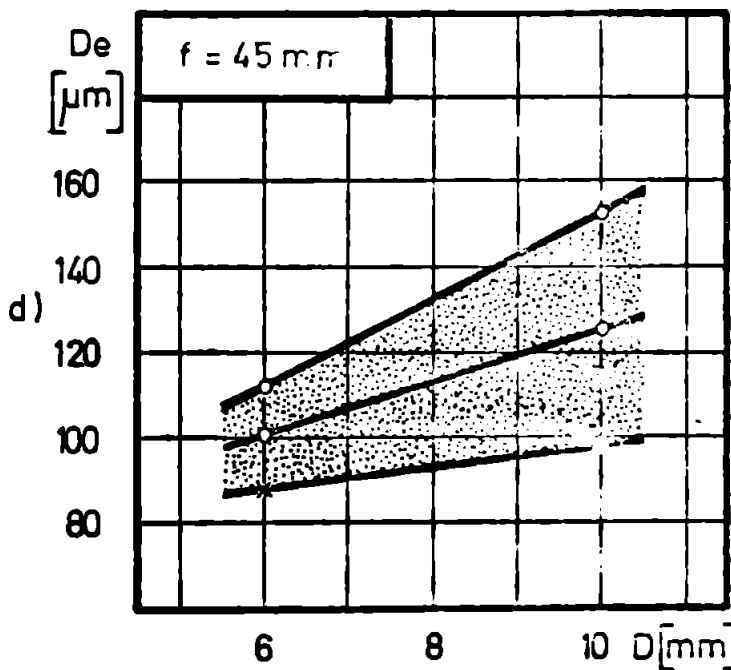
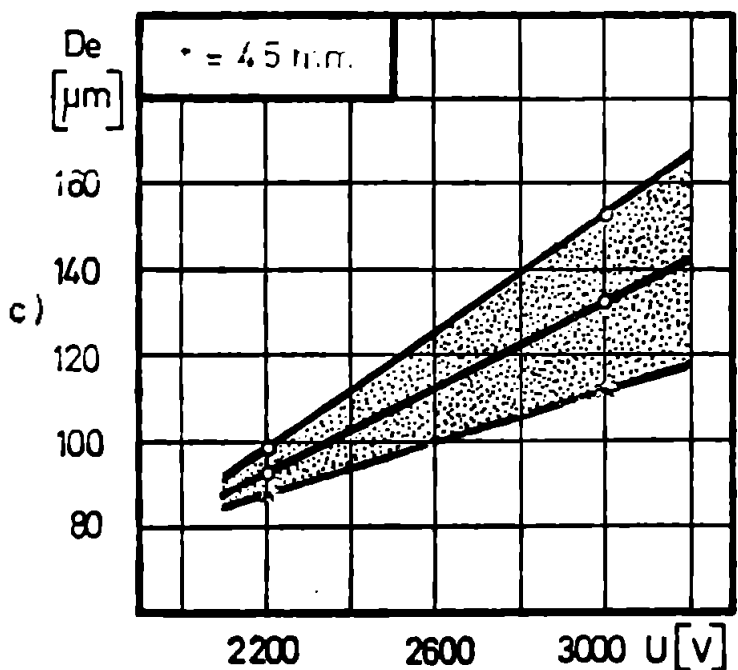
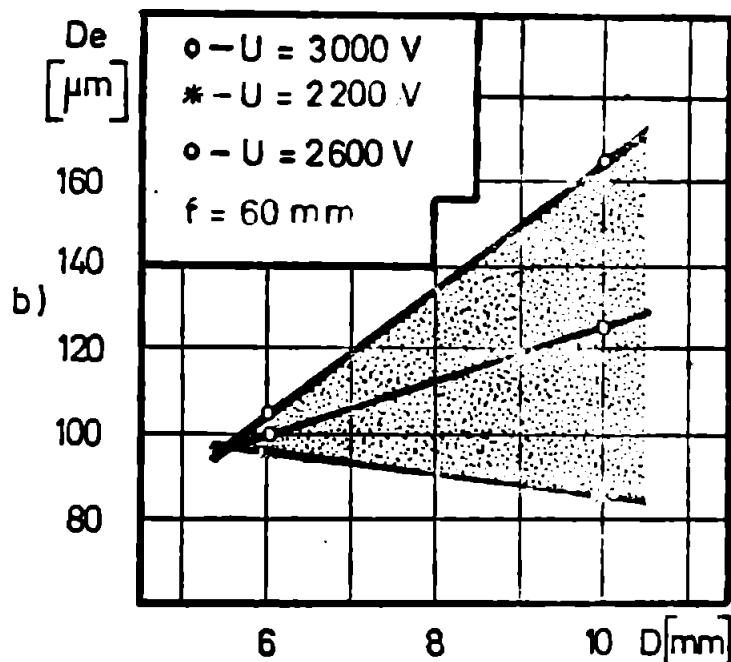
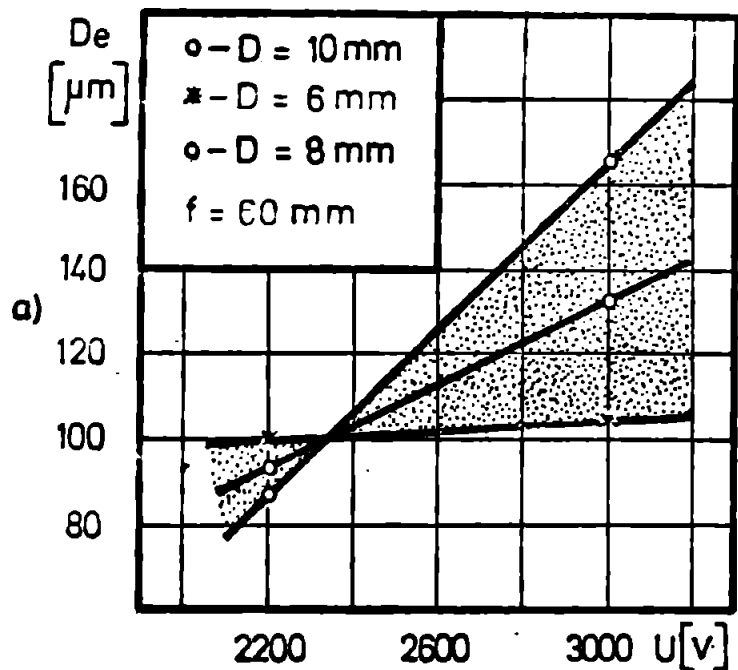


Fig. 5.12. Reprezentarea ecuațiilor de regresie parțiale pentru De

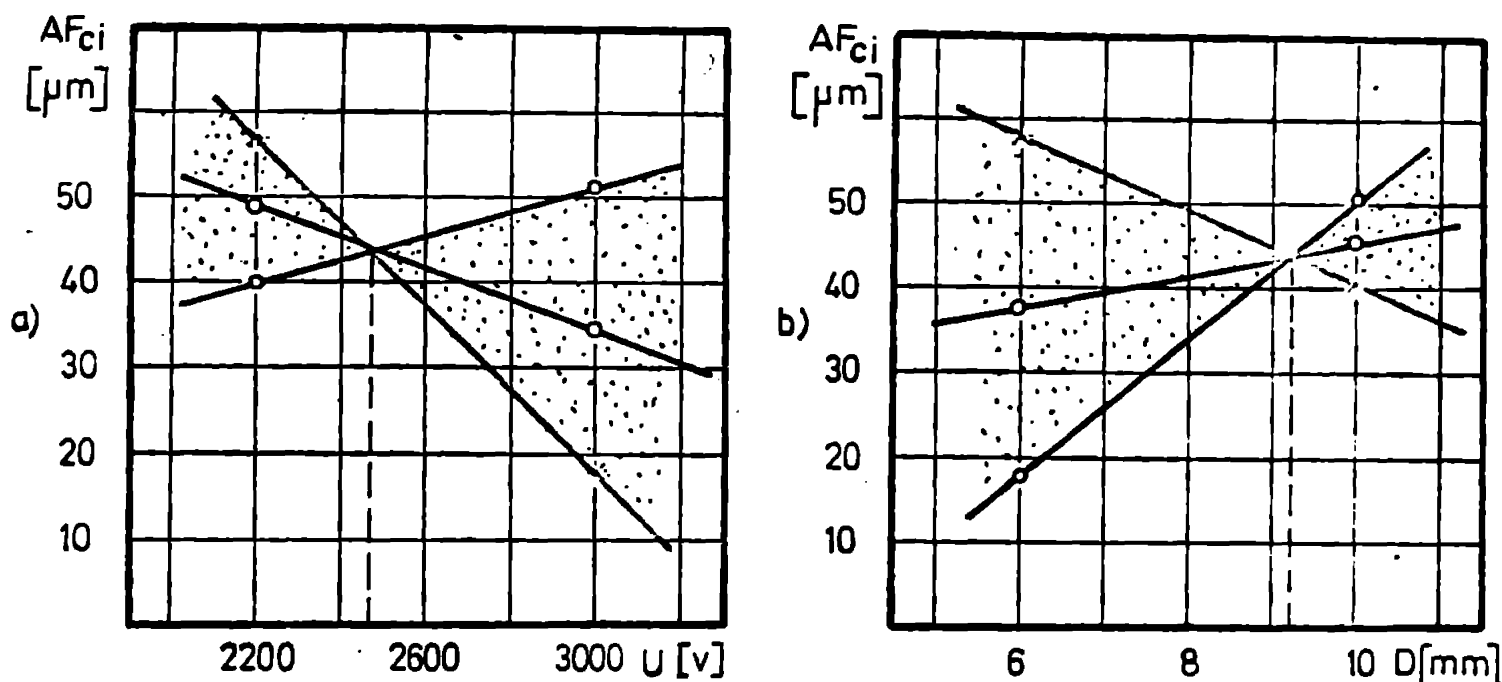


Fig 5.13. Variația abaterii de la circularitate la intrarea fascicului.

Qualitatea orificiului la "ieșirea" fascicului laser AF_{c_0} (fig.5.14) crește odată cu creșterea tensiunii, ordinul de mărime al acesteia fiind însă mult sub valoarea lui AF_{c_1} .

Din aceste considerente, abaterea de la circularitate a orificiilor obținute prin prelucrare cu ajutorul laserului prezintă interes și deci trebuie urmărită doar la suprafața de "intrare" a fascicului în material.

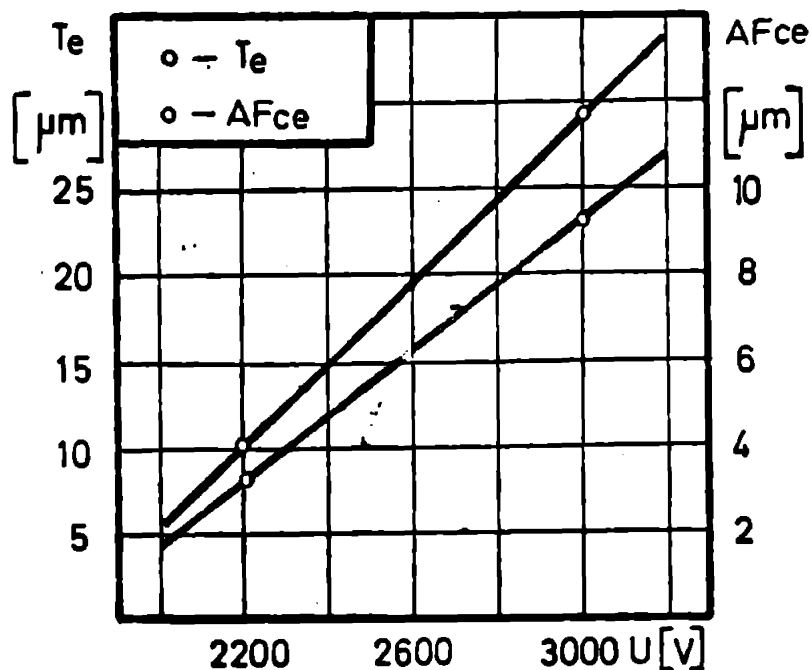


Fig. 5.14. Variația toleranței și a abaterii de la forma circulară a diametrului orificiului de ieșire

Abaterea de la circularitate a orificiului (AF_1) (fig. 5.15) este influențată de toți parametrii regimului de prelucrare și în mod deosebit de interacțiunea acestora. Deși tensiunea de încărcare a condensatorilor determină o variație proporțională a conicității, interacțiunile U-f și U-D sînt cu pondere suficient de mare

$$y_g = 101,36 - 9,76 x_1 + 4,51 x_3 + 10,95 x_1 x_3 + 12,76 x_1 x_2$$

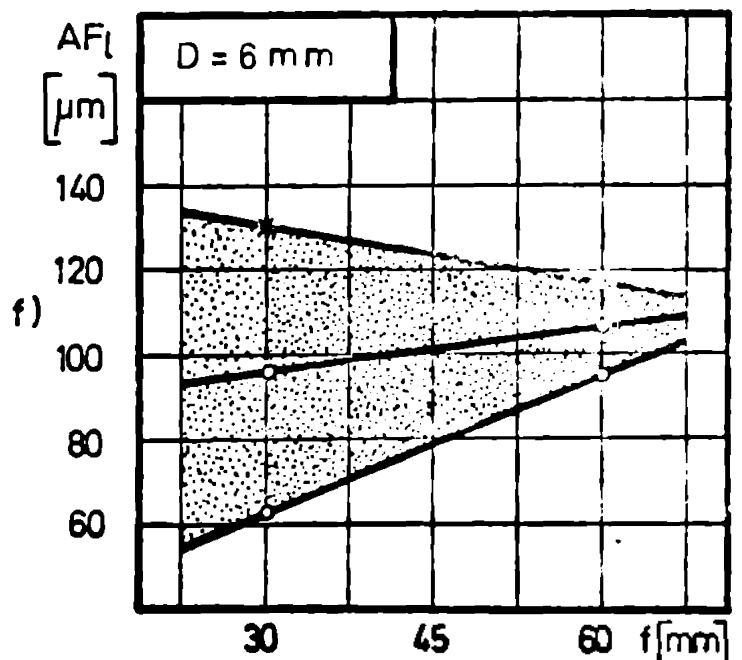
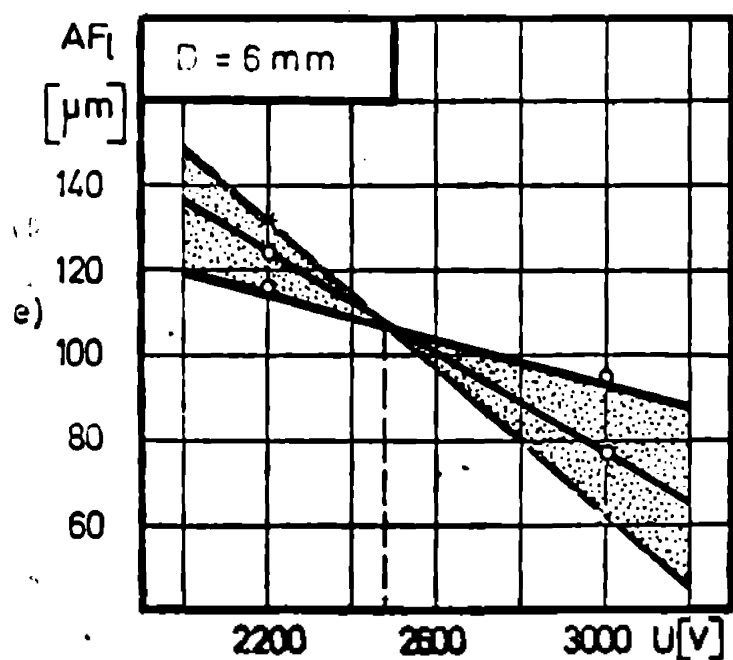
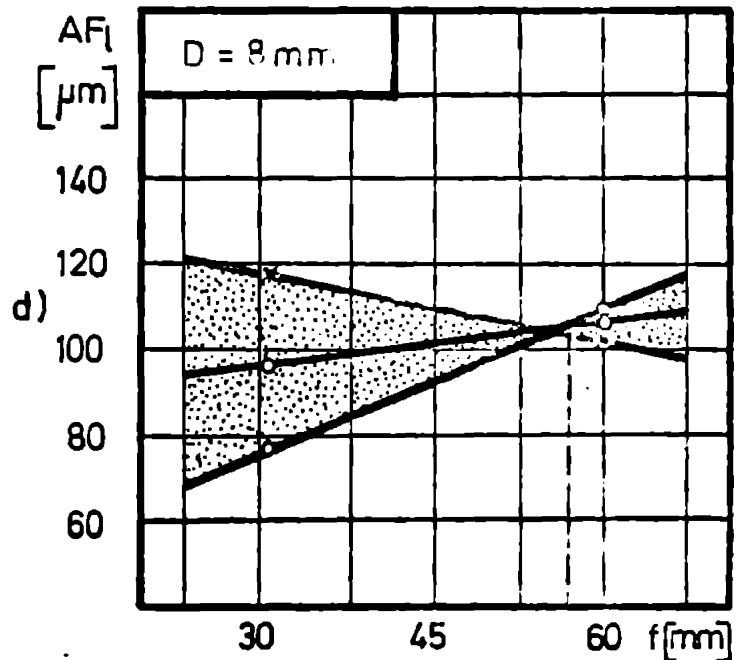
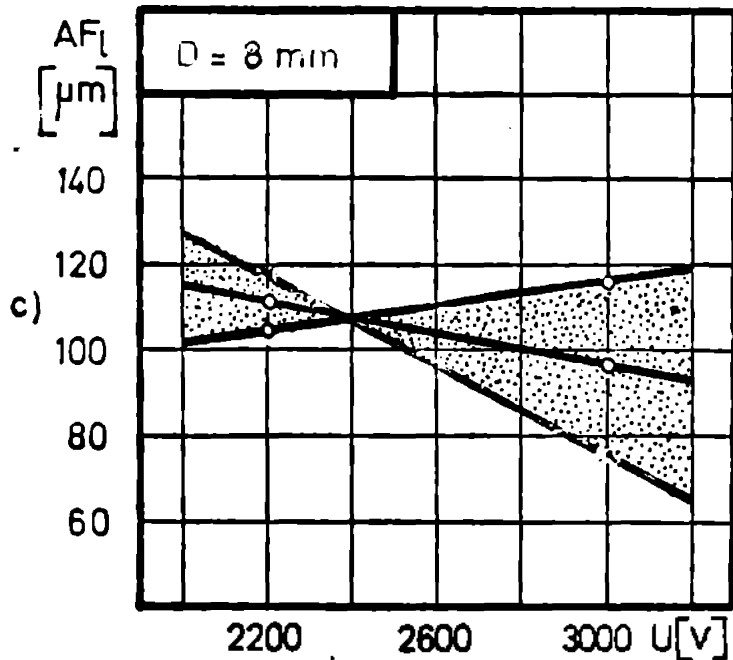
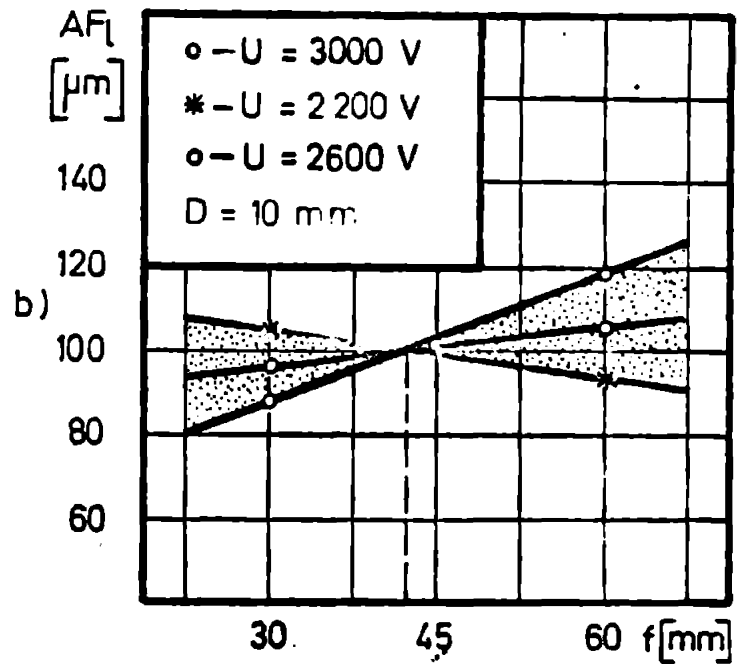
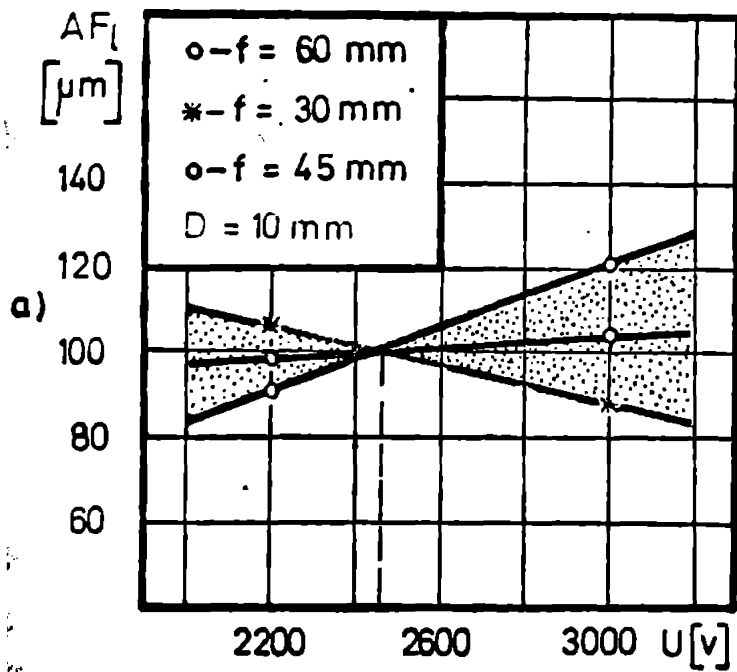


Fig. 5.15. Abateră de la forma cilindrică a orificiului.

pentru ca în anumite cazuri să apară o variație direct proporțională a conicității cu mărimea tensiunii. Micșorarea valorii conicității cu creșterea tensiunii la diafragme mici se explică, ca și în cazurile precedente, prin numărul mai mic de impulsuri ce se aplică pînă la străpungerea semifabricatului. Se constată de asemenea, că orificiul obținut cu ajutorul laserului se apropie mai mult de o formă cilindrică atunci cînd se utilizează, în limitele domeniilor de variație ale parametrilor acceptate în prezenta lucrare, tensiuni de încărcare ale condensatorilor de cca 3000 V și diafragme de 6 mm diametru.

Mărimea cîmpului de toleranță obținut pentru valoarea diametrului orificiului depinde în mare măsură de energia impulsului laser și de diametrul diafragmei. Toleranța practică a diametrului la "intrarea" fasciculului laser în material (fig.5.16) prezintă valori mult mai mari decît cea a diametrului de ieșire (fig.5.14). Se obțin astfel alezaje a căror precizie se poate încadra între clasa a 7-a și clasa a 12-a de precizie (IT7 - IT12)

Obținerea clasei a 7-a de precizie este posibilă doar pentru D_0 și doar la valori ale tensiunii de încărcare a condensatorilor de 2.200 V.

Privind în ansamblu precizia dimensională a celor doi diametri (D_1 și D_0) se poate observa că în mod curent, clasele 10, 11 de precizie se obțin la utilizarea unor regimuri de prelucrare care conduc și la o precizie de formă geometrică mai bună ($U = 3000$ V; $D = 6$ mm)

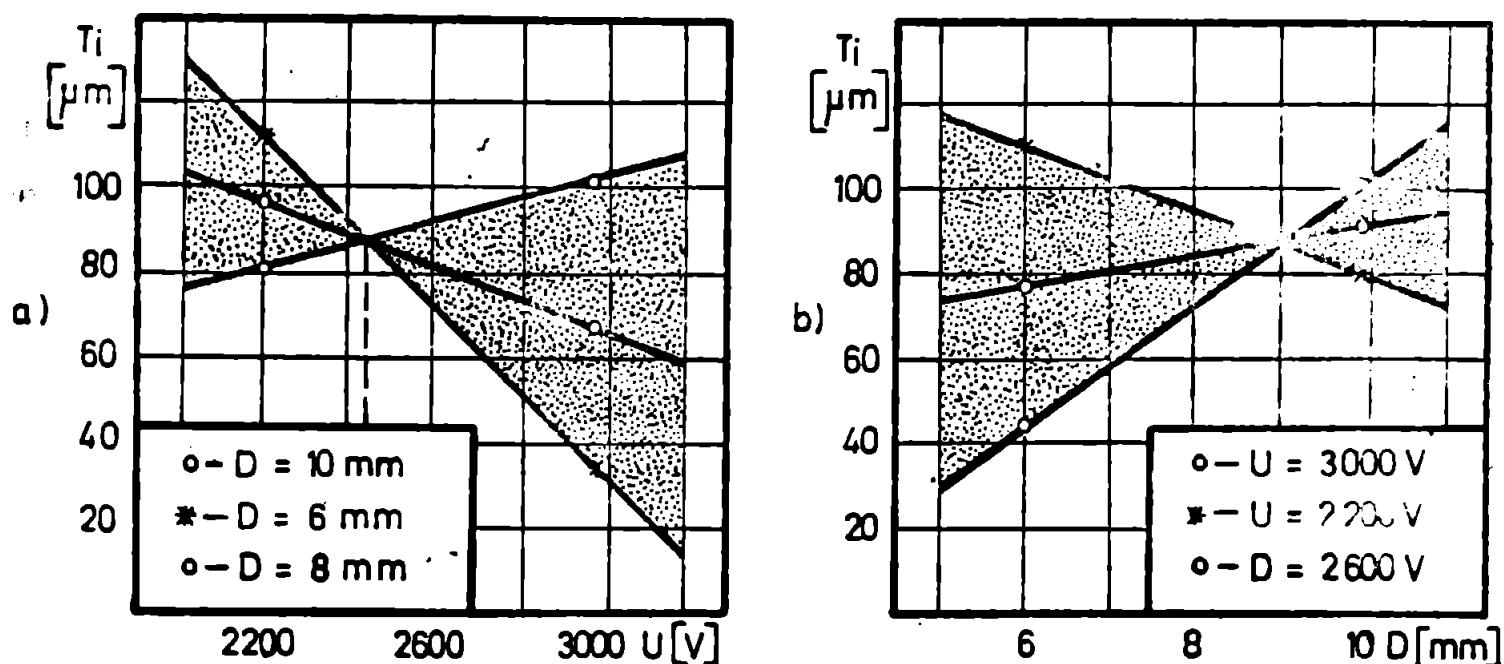


Fig. 5.16. Variația toleranței diametrului orificiului la intrarea fasciculului laser

Durata prelucrării unui orificiu (τ_p) (fig.5.17) scade, așa cum era de așteptat, odată cu creșterea energiei impulsului (tensiunii de încărcare a condensatorilor) și a diametrului diafragmei. Pentru cazul considerat la tensiunea de 3000 V durata prelucrării este aceeași indiferent de diametrul diafragmei.

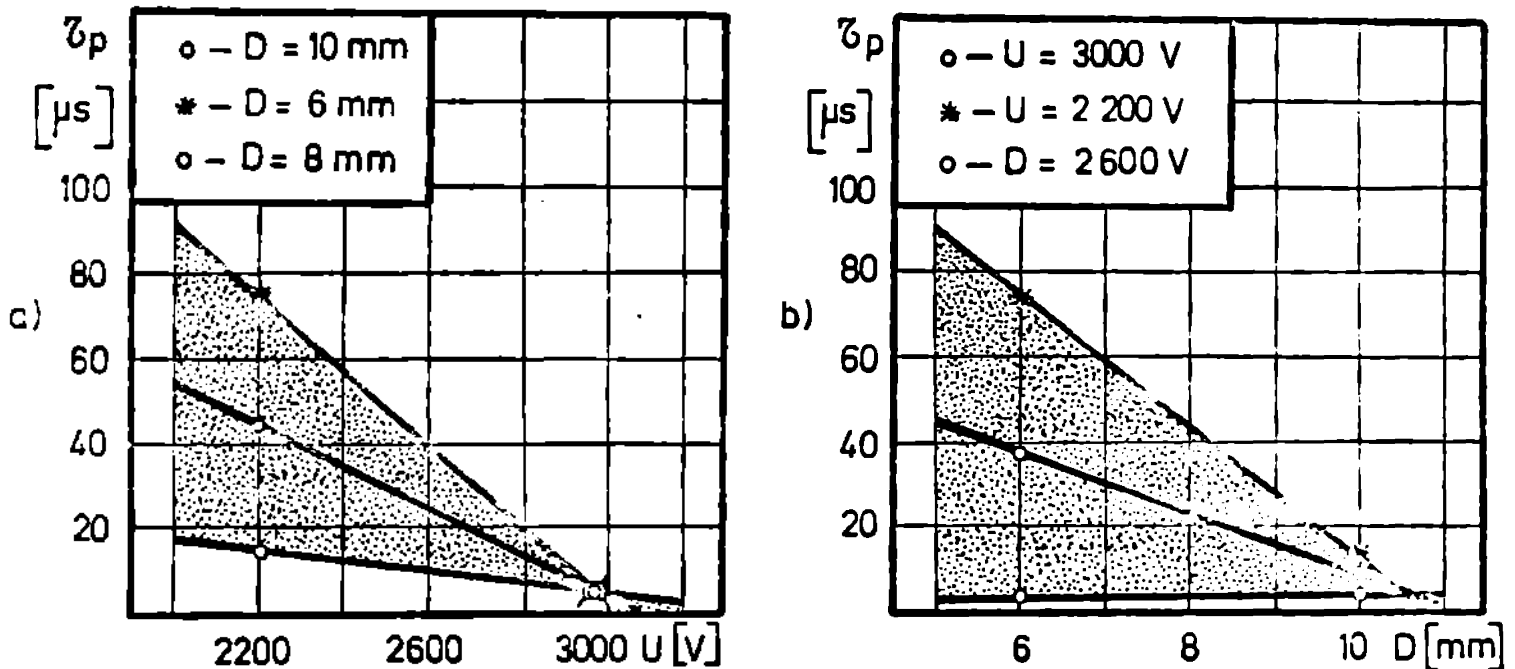


Fig. 5.17. Variația duratei de prelucrare

5.5. Unele aspecte privind influența fasciculului laser asupra zonelor marginale ale microalezajelor prelucrate cu laser în oțelul 20 Cr.130.

Fenomenele care au loc la interacțiunea radiației laser cu materialul supus prelucrării sînt deosebit de complexe și ele au fost prezentate în capitolul 3 al acestei lucrări.

Încălzirea materialului pînă la temperatura de topire sau chiar de vaporizare, determină modificări de structură atît în materialul prelevat sub formă lichidă, cît și în zonele limitrofe ale microalezajului prelucrat.

Cercetările multiple /53,78/ ale variației structurii cît și a proprietăților materialelor în urma găuririi sau formării craterelor au arătat că se deosebesc trei categorii de straturi influențate termic:

- metal care a fost topit și s-a solidificat pe suprafața interioară a orificiului perforat,
- metal care a fost topit și expulzat din crater, solidificîndu-se apoi pe marginea orificiului,

- strat de metal care a fost puternic încălzit dar nu a ajuns la temperatura de topire.

Pornind de la aceste constatări bibliografice s-a considerat oportun studiul asupra modificărilor stratului marginal al alezajelor prelucrate cu laser. În acest sens s-a apelat la metoda de analiza metalografică pentru a urmări, fără pretenția de a dobândi concluzii exhaustive, influența radiației laser asupra stratului marginal al orificiului, pentru care concluzii sînt necesare cercetări de specialitate laborioase. În tematica lucrării nefiind cuprinse aceste aspecte, ele se prezintă doar informativ. De remarcat, de asemenea, că nu s-a analizat starea materialului topit și expulzat din crater.

În capitolul 3 s-au tratat aspecte referitoare la descrierea cauzală și a răspunsurilor de efect cantitativ și calitativ a decurgerii fenomenelor. Aceste aspecte se urmăresc și prin analiza metalografică în limitele în care le oferă această metodă de investigare.

Sfera de tratare a acestor probleme prin metoda microscopiei și microfotografiei, oferă doar unele constatări preliminare, fără a cuprinde în mod complet detaliile, în pofida importanței lor incontestabile. Autorul își propune în viitor de a efectua studii capabile să ofere o imagine cît mai completă a fenomenelor ce se petrec în vecinătatea zonei marginale a orificiului obținut cu ajutorul laserului.

5.5.1. Pregătirea probelor metalografice

Materialul asupra căruia s-au făcut aceste studii preliminare a fost oțelul inoxidabil 20 Cr 130 cu un conținut de 0,2% C și 12,79% Cr.

Din tablă de 1 mm grosime, găurită cu ajutorul laserului, s-au prelevat probe metalografice prin secționare în două direcții față de geometria pseudocilindrică a orificiilor.

O secțiune (A-A) a fost efectuată în direcție transversală cu un plan perpendicular pe axa geometrică a orificiilor. Fînd seama de faptul că probele au fost prelevate și în secțiuni longitudinale (B-B) practicate printr-un plan meridian (fig.5.18), nu s-au considerat necesare mai multe secțiuni succesive după direcția transversală, deoarece, de-a lungul generatoarei secțiunii longitudinale, sînt prezente toate porțiunile stratului limitrof.

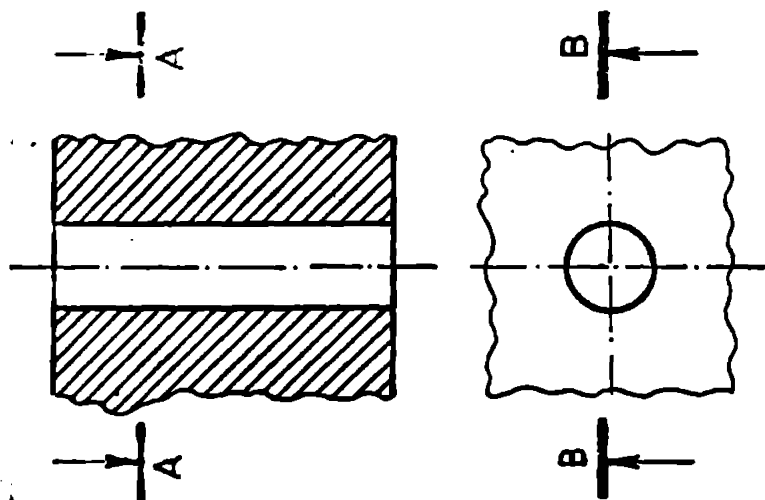


Fig. 5.18 Planele de secționare la pregătirea probelor metalografice.

Pregătirea pentru șlefuire s-a făcut printr-o prealabilă înglobare a eșantioanelor în dispozitiv-suport cu ajutorul acrilatului iar șlefuirea s-a realizat cu apă pe hîrtii metalografice speciale. Instruirea probelor metalografice a fost făcută pe pîslă din lînă merinos cu suspensie de oxid de aluminiu (Al_2O_3) de puritate 99,98% și granulație 8.000 Å, precum și cu pastă cu pulbere de

diamant. Examinarea după lustruire a formei orificiilor, în cele două secțiuni, se prezintă în general ca în fig. 5.19 a, b.

Pentru analiza structurii s-a efectuat un atac cu reactiv specific oțelurilor inoxidabile: acid azotic (HNO_3 - 40%), acid clorhidric (HCl -20%) și apă distilată (20%). (În subsolul fotografiilor de microstructuri acest reactiv s-a notat convențional cu reactiv R").

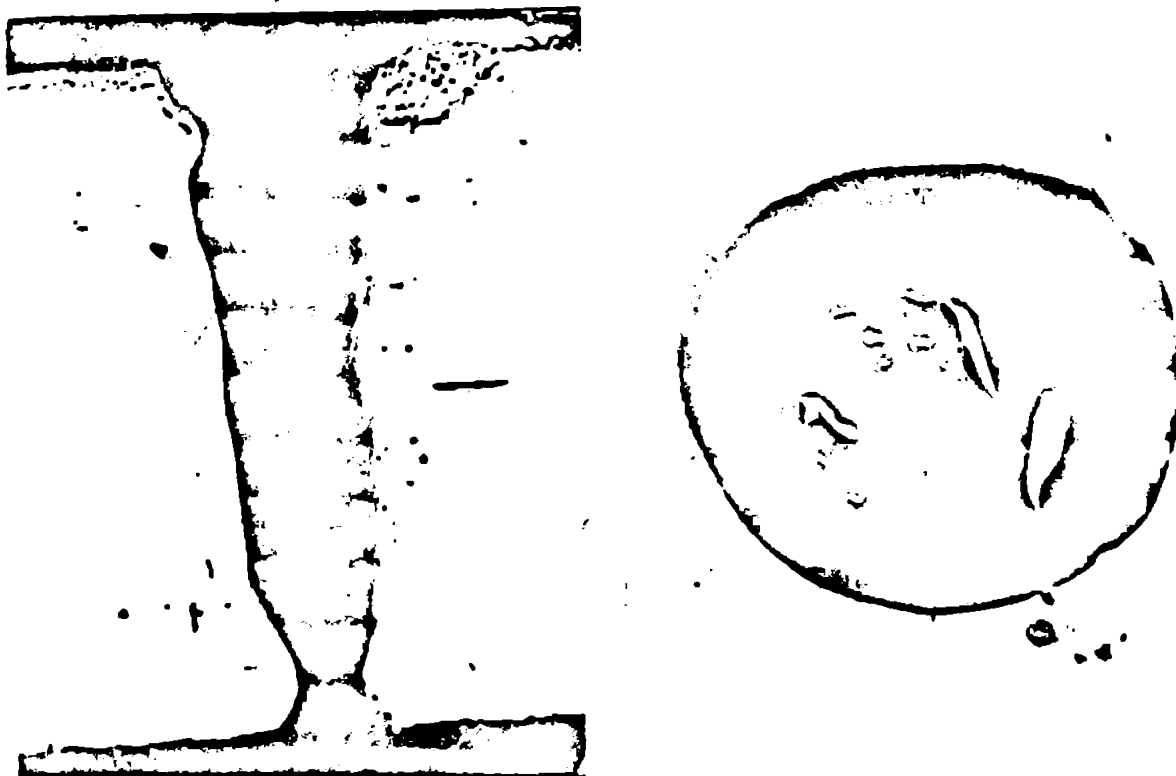


Fig. 5.19. a) Orificiu practicat cu laserul ^{b)} Neodim 15" în oțel 20 Cr 13o (proba 142), a) în secțiune longitudinală (mărire: 50x), b) în secțiune transversală (mărire: 125x)

5.5.2. Aprecieri cu privire la transformările ce apar în zonele afectate de fasciculul laser.

În general aspectul metalografic al materialului analizat este cel al unui oțel martensitic, prezentînd însă în structură numai pe alocuri martensită criptică și în general formațiuni coalescente de carburi de crom pe fondul unei soluții solide de tip α bogat aliate cu crom. Structura este caracterizată în general de fenomene favorizate de încărcarea ereditară referitoare la creșterea grăuntelui de austenită. Aceasta rezultă clar în zonele influențate de procesul termic, în care, după răcire apar formațiuni de tip martensito-austenitic (soluții solide suprasaturate) cu grăunți cristalini mari, trădînd o puternică atitudine preferențială de orientare în direcția pierderilor de căldură (în sensul orificiu - material de bază).

Microscopic, aspectul apare dominat de efectul termic propriuzis manifestat de un veritabil "tropism termic". Acesta determină apariția de formațiuni asemănătoare unor petale a constituențului din zona limitrofă a orificiului (fig. 5.25 c).

Asimetria formațiunii limitrofe și chiar lipsa zonei influențate termic este determinată, printre alte cauze, și de abaterea de la perpendicularitate a direcției fasciculului laser față de suprafața piesei. Această abatere de la perpendicularitate, constatată și prin înclinarea axei alezajului față de direcția perpendiculară pe suprafață (fig. 5.19 a), favorizează expulzarea preferențială a topiturii din crater și iradierea neuniformă pe circumferință a probei supuse prelucrării.

Lipsa stratului alb (sau neevidențierea sa prin mijloacele de investigare din prezenta lucrare) se explică prin condițiile net diferențiate pe care le oferă prelucrarea cu laser față de alte procedee tehnice de prelucrare. Durata foarte redusă a persistenței sursei termice pe piesa de prelucrat determină o reducere apreciabilă a zonei influențate termic. Aceleași considerații apar și în aportul explicației referitoare la trecerea fără porțiuni intermediare dintre zonă influențată termic și structura de bază a materialului. (fig. 5.25)

La unele probe fenomenul de influență termică este neglijabil sau foarte diminuat. În unele situații sau pe porțiuni anume, fenomenul de influență termică nu apare, sau cel puțin nu poate fi evidențiat prin metoda metalografică optică (fig. 5.22, 5.24).

Explicațiile date în unele situații se prezintă cu o anumită rezervă datorită neevidențierii, în experimentările făcute, a tuturor factorilor care însoțesc procesul de prelevare de material cu ajutorul laserului. Aceste aspecte impun preocupări și cercetări laborioase în vederea cunoașterii influenței parametrilor de prelucrare asupra stării structurale a materialului.

Din cercetările pentru determinarea durității sub microscopie a stratului marginal al suprafeței prelucrate s-a constatat că și această metodă de investigare conduce la aceleași concluzii care rezultă prin coroborare cu cele ale analizei metalografice, și cele ale considerațiilor de ordin general tratate în lucrare. Astfel, se observă o variație evidentă a durității dinspre limita de separație orificiu-material spre materialul de bază, în sensul scăderii acestei durități. Această modificare de duritate se observă atât prin mărimea amprentelor cât și prin asimetria acestora în direcția materialului de bază. O variație mai pronunțată a durității se constată și în raport cu regimul de prelucrare adoptat pentru probele analizate, duritatea stratului marginal fiind cu atât mai mare cu cât energia fascicului a fost mai mare (fig. 5.20).

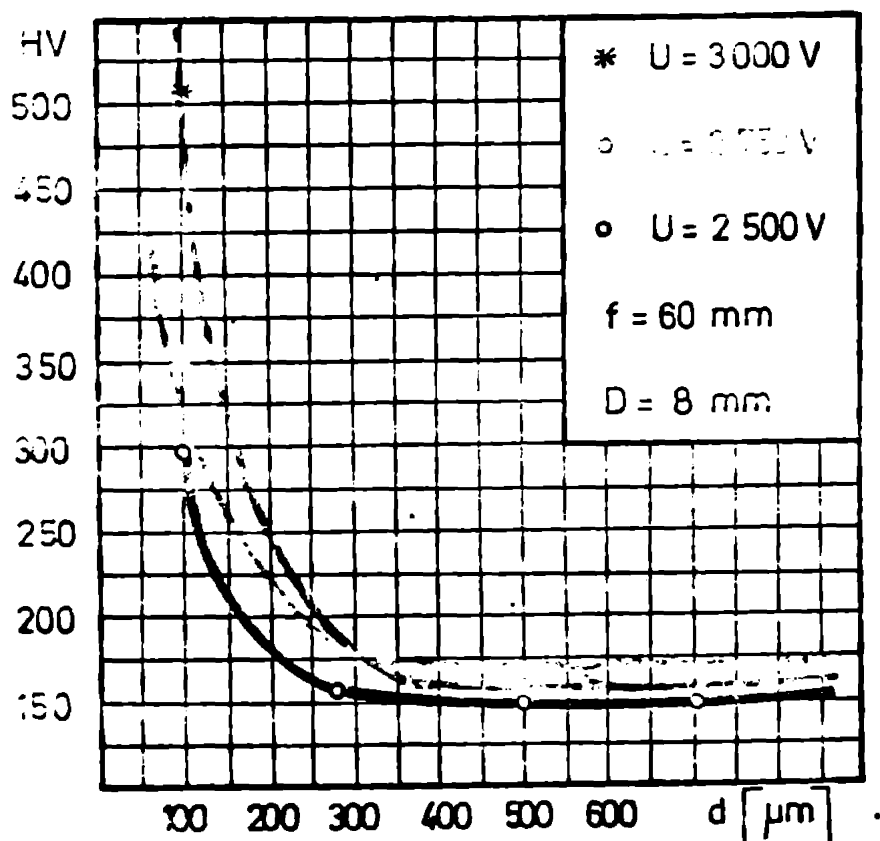


Fig. 5.20 Variația durității dinspre marginea orificiului ($d=0$) înspre materialul de bază.

Lățimea stratului afectat termic variază atât pe circumferința orificiului cât și de-a lungul axei generatoare a acestuia, atingând o valoare maximă de cea 300 μm.

Pentru evidențierea influenței energiei fascicului asupra stratului marginal au fost prelucrate mai multe probe, după metodologia descrisă anterior, pentru regimuri de prelucrare diferite.

Astfel, menținând constantă distanța focală și diametrul diafragmei, s-au realizat orificii cu o energie a laserului corespunzătoare unor tensiuni de încărcare a condensatorilor de 2.500 V, 2.750 V și 3.000 V; orificii analizate atât în secțiune longitudinală cât și în secțiune transversală.

În fig.5.21 se prezintă marginea orificiului și zona limitrofă a acestuia într-o secțiune longitudinală. Se observă două zone cu limită de separație evidențiată vag. În zona marginală apare o martensită criptică cu formațiuni pseudo poliedrice ale soluției solide de tip γ' , iar în structura materialului de bază se remarcă, alături de martensită, precipitații ale unor compuși chimici. Variația durității este evidentă.

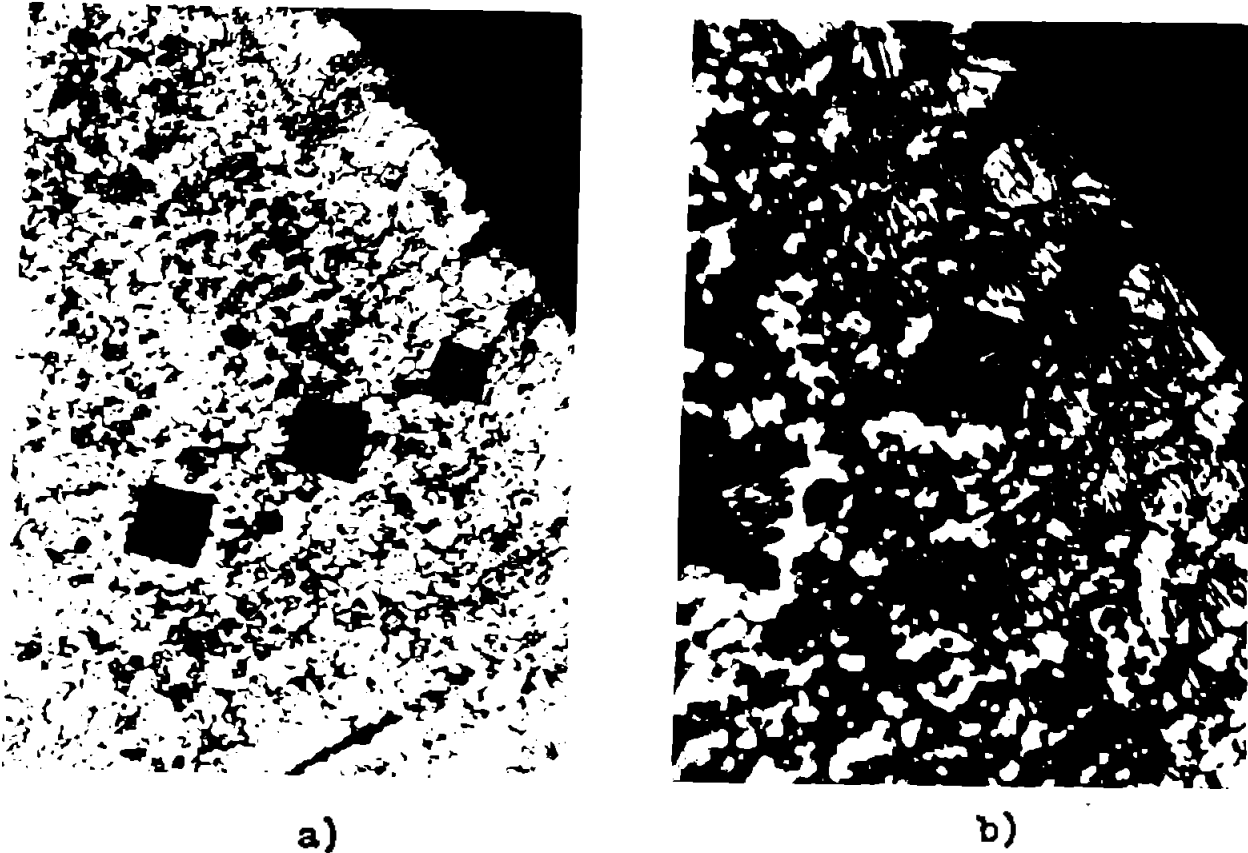


Fig. 5.21. Microstructura orificiului în secțiune longitudinală
U = 2500 V ; atac: reactiv R; mărire: a) 800x,
b) 1000x.

Figura 5.22 prezintă orificiul obținut pentru un alt regim de prelucrare, zona influențată termic fiind mult mai redusă. Se observă (fig.5.22 b) asimetria pronunțată a amprentei de duritate din zona învecinată marginii tăieturii.

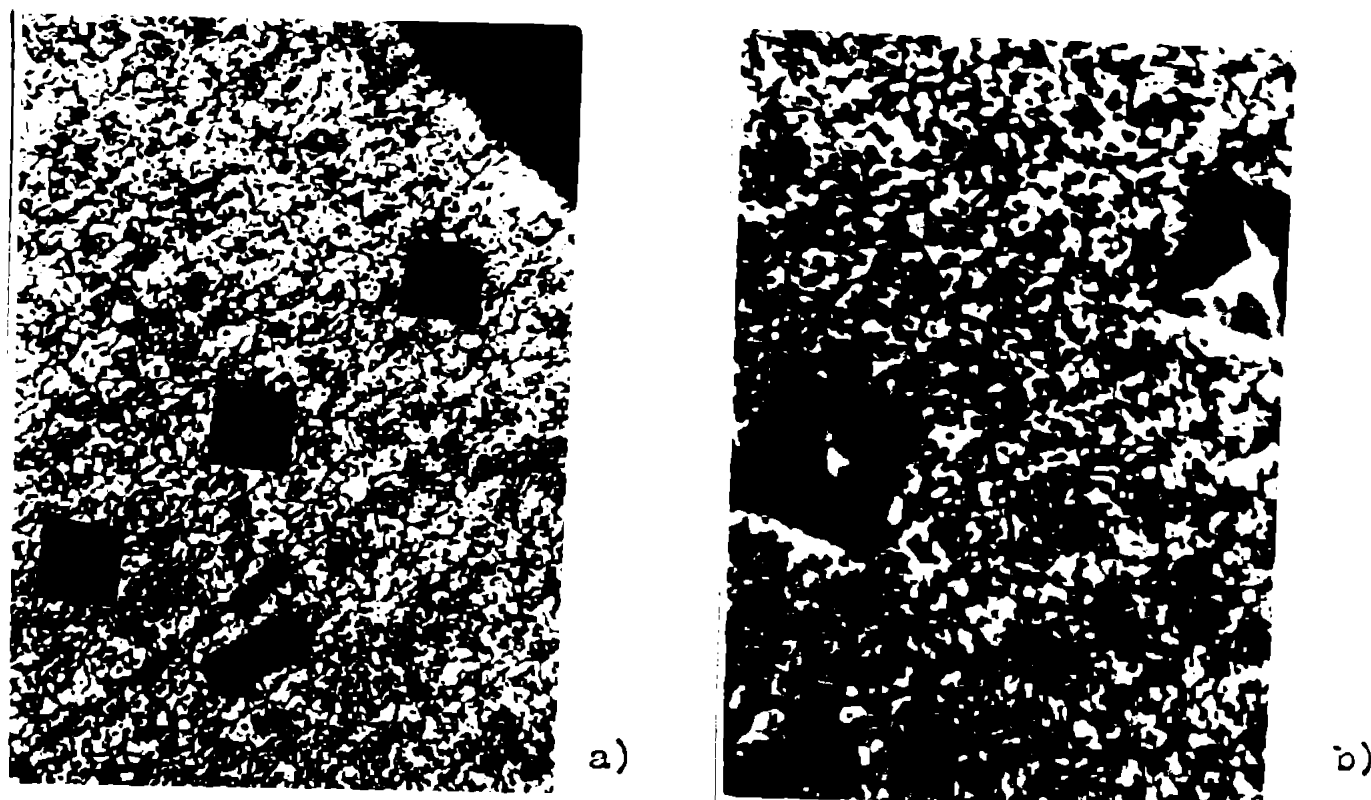


Fig. 5.22. Microstructura orificiului în secțiune longitudinală; U=2750 V; atac:reactiv R; mărire a)800x, b)1000x

O variație mai pronunțată a durității se remarcă la utilizarea unui regim de prelucrare cu o energie a impulsului mai mare (U=3000 V)(fig.5.23). Limita de separație a zonei afectată termic se observă aici suficient de ferm ca și structura poliedrică neclată (fig.5.23b) de tip δ' . În zona materialului de bază apar precipitații ale unor compuși chimici (carburi pe soluție solidă de tip α .)

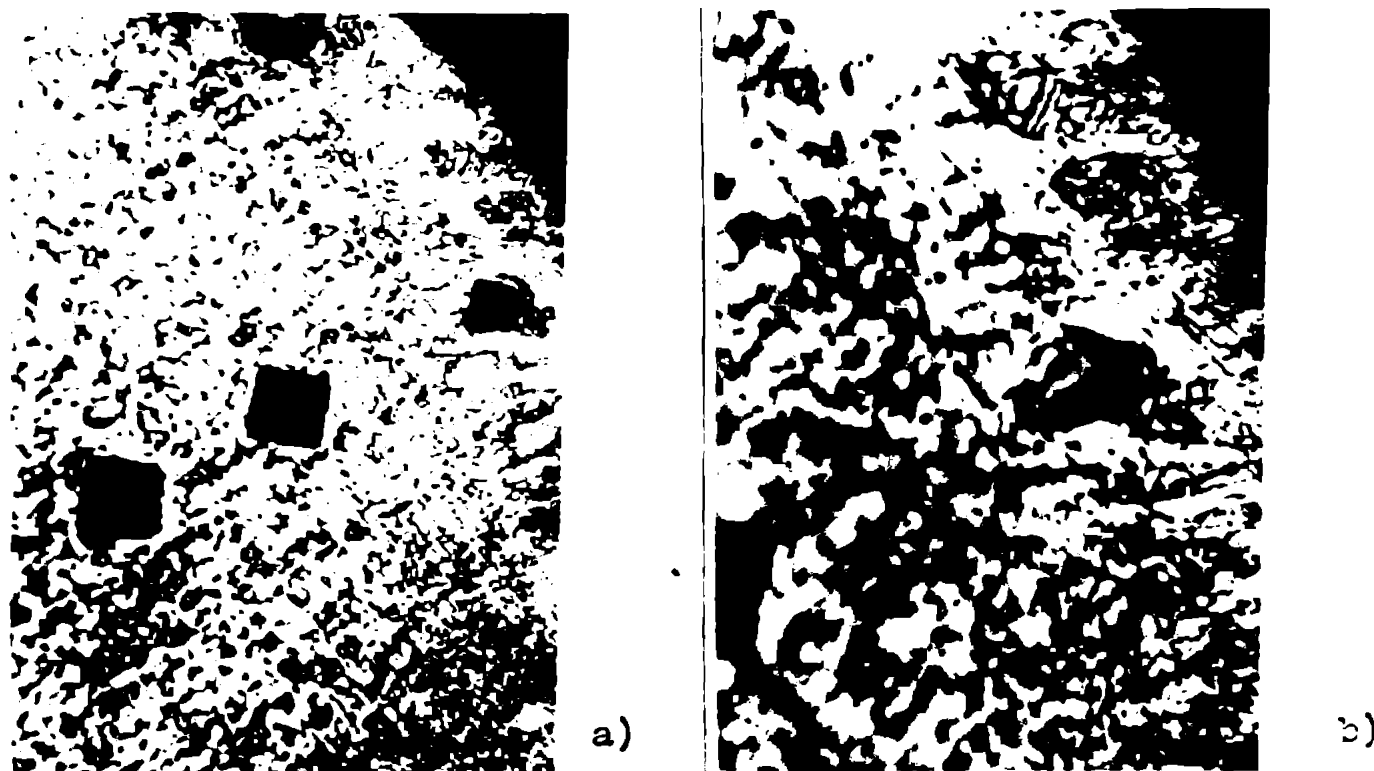


Fig.5.23. Microstructura orificiului în secțiune longitudinală; U=3000 V; atac:reactiv R; mărire: a)800x, b)1000x.

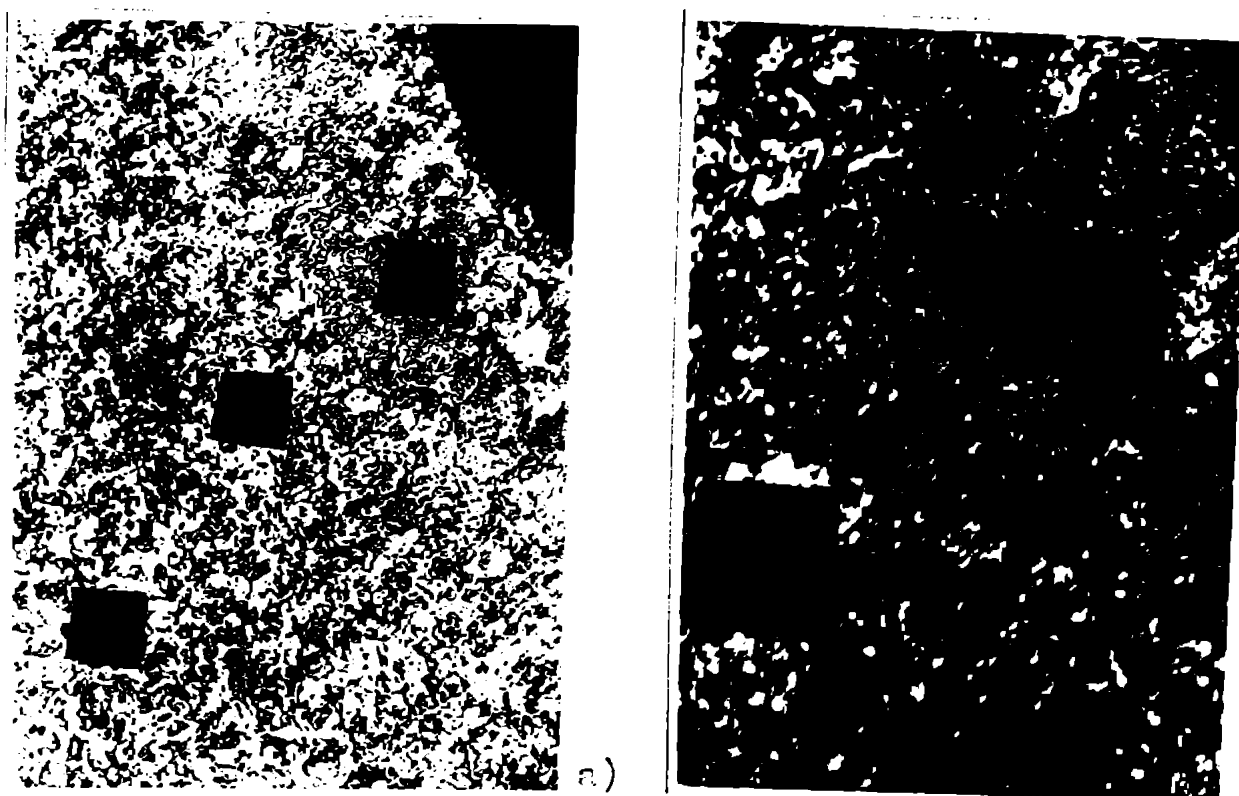


Fig.5.24. Microstructura orificiului în secțiune transversală; $U=2.500$ V; atac:reactiv R; mărire: a)800x, b)1000x.

În figura 5.24 se prezintă microstructura zonei marginale a orificiului în secțiune transversală la o tensiune de încălzire condensatorilor de 2500 V. Limita de separație între zona influențată termic și cea a materialului de bază nu se evidențiază; se observă însă clar anizotropia amprentei de duritate (fig.5.24 b).

În mod diferit se prezintă însă fenomenele pentru un regim de prelucrare cu o energie a impulsului mai mare (fig.5.25). Se disting aici deosebit de ferm cele două zone, cea afectată termic și cea a materialului de bază. Zona afectată termic prezintă o existență remarcabilă la atac astfel încât, în fig.5.25 a și b să apară ca neatacată. În zona materialului de bază apare aceeași structură ca și în cazurile precedente. La un atac mai pronunțat (fig.5.25 c), se observă în zona influențată termic formațiuni filiforme orientate preferențial în direcția pierderilor de căldură. Constituentul din această zonă are o duritate foarte mare, amprentele de duritate fiind pronunțat anizotrope.

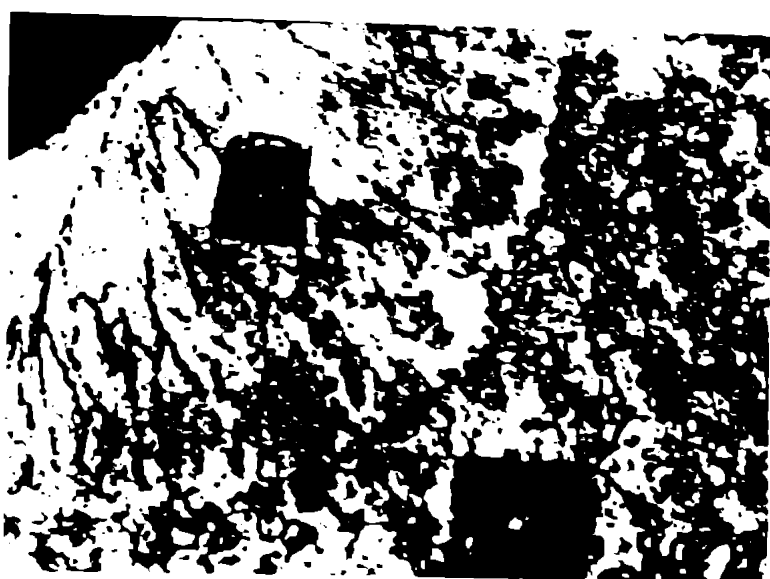
Marginea orificiului și zonele limitrofe prezintă o structură similară și pentru un regim de prelucrare caracterizat prin energie mai mare. (fig.5.26). Variația de duritate este însă mai puțin pronunțată iar lățimea zonei care prezintă modificări structurale evidente este mult mai îngustă. Acest lucru se explică prin faptul că pe măsură ce crește energia impulsului, temperatura mesei de metal îndepărtate la un impuls este tot mai mare, materialul



a)



b)



c)

fiind prelevat în proporție mai mare în stare de vapori. Cantitatea de căldură preluată de materialul de bază este mai mică și deci zona influențată termic este mai redusă

Fig.5.25. Microstructura orificiului în secțiune transversală: $U=2750$ V; reactiv R ; mărire : a) 800x, b) 1000x, c) 1000x (cu atac mai intens)

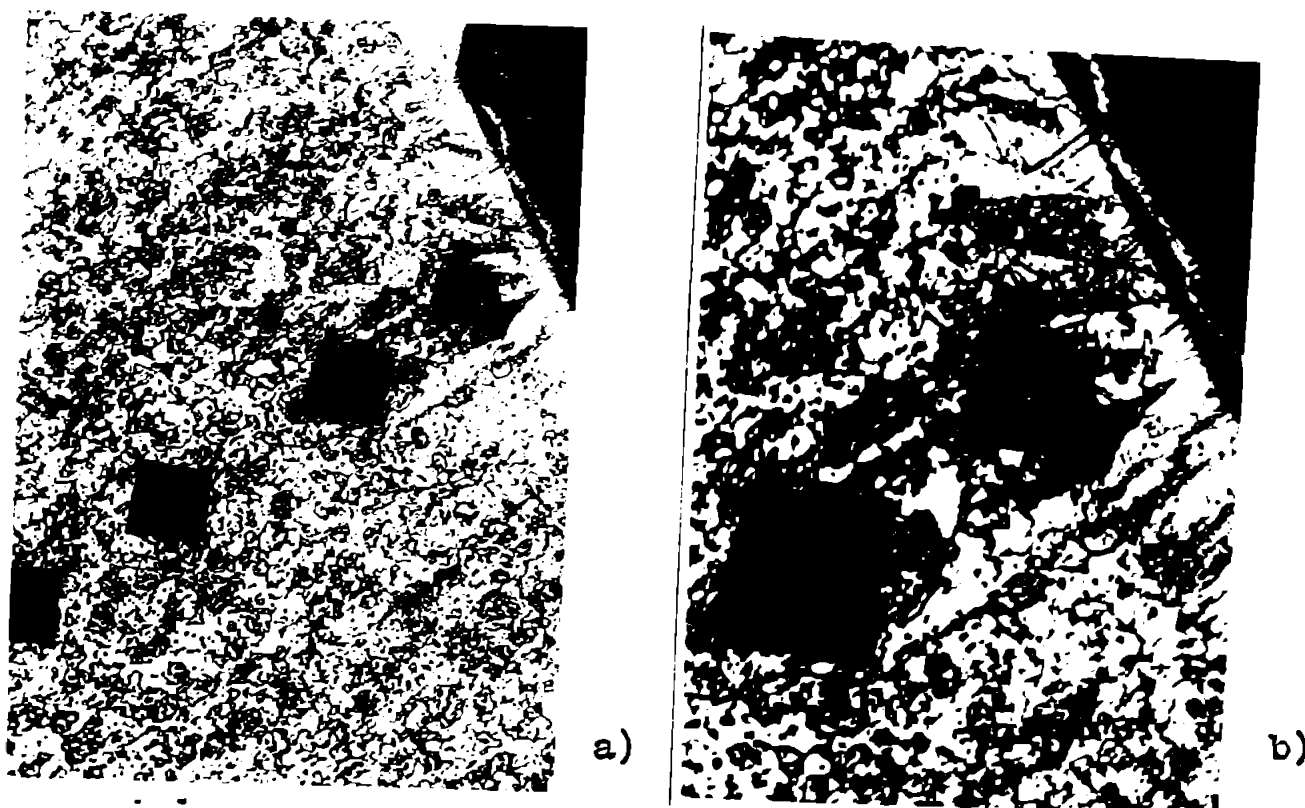


Fig. 5.26. Microstructura orificiului în secțiunea transversală; $U=3000$ V; atac reactiv R; mărire : a) 800x, b) 1000x.

5.6. Cîteva considerații finale privind prelucrarea cu ajutorul laserului a orificiilor în oțel inoxidabil 20 Cr 130

Se poate aprecia că prelucrarea oțelului 20 Cr 130 cu ajutorul fasciculului laser produs de instalația "Neodim 15" decurge în condiții de productivitate și precizie de prelucrare corespunzătoare.

Variabilele independente luate în considerare influențează în mod preferențial atât parametrii preciziei de dimensiune și de formă geometrică cât și structura stratului marginal al orificiului perforat.

În marea majoritate a cazurilor, drept variabile independente de bază pot fi considerate: energia fasciculului și diametrul diafragmei utilizate.

Mărimea distanței focale a obiectivului utilizat cât și poziția petei focale față de suprafața piesei produc, cel puțin pentru grosimea de material analizată, efecte neesențiale asupra valorilor funcțiilor de răspuns considerate.

Prin acest procedeu de prelucrare se pot obține orificii în materialul analizat, a căror precizie se poate încadra în clasele de precizie 10 - 11.

Ovalitatea orificiilor obținute prezintă interes doar la nivelul suprafeței orientate către fasciculul laser, ea fiind mult mai mare decât ovalitatea orificiului de pe suprafața opusă.

Forma orificiilor în secțiune longitudinală este neregulată, cu tendințe spre o formă conică avînd diametrul maxim la nivelul suprafeței de "intrare" a fasciculului în material.

În general se poate aprecia că parametrii de precizie dimensională și de formă geometrică se obțin la valoarea lor optimă pentru energii mai ridicate ale fasciculului laser și la valori reduse ale diametrului diafragmei.

Productivitatea procedurii este foarte ridicată dacă se utilizează o energie convenabilă a fasciculului, impreciziile dimensionale și de formă geometrică situează însă această metodă de prelucrare, în marea majoritate a cazurilor, în rîndul procedurilor de degroșare; orificiile astfel obținute necesitînd o finisare ulterioară.

Efectul termic produs de radiația laser determină modificări de structură și de duritate în stratul marginal al orificiului, modificări ce depind de o serie de factori și nu în ultimul rînd de regimul de prelucrare utilizat.

20.

6. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE
PRIVIND TAIEREA CU LASER A UNOR
MATERIALE METALICE SI NEMETALICE.

Aşa cum s-a arătat în introducerea prezentei lucrări, instalațiile laser de producție românească sînt modele experimentale sau realizări într-un număr redus de exemplare. Constructorul acestor instalații nu este preocupat în mod deosebit de stabilirea posibilităților concrete de aplicare în practică a acestor instalații, indicațiile cu privire la domeniul de utilizare fiind cu caracter general.

Prin creerea unui laborator laser la facultatea de Mecanică din Timișoara s-a pus problema de a găsi, pentru aceste instalații, un loc de aplicare concretă în producție. În urma unor încercări preliminare de prelucrare a anumitor materiale metalice și nemetale, s-au putut estima posibilitățile concrete pe care le oferă instalațiile laser produse de IFTAR București.

Comunicarea acestor rezultate la diverse manifestări cu caracter științific a suscitat interesul unor întreprinderi industriale din județ sau din afara acestuia. S-au concretizat astfel contracte de cercetare științifică, rezultatele acestor colaborări fiind, în anumite cazuri, spectaculoase. S-au rezolvat astfel unele probleme privind prelucrarea cu laserul a unor materiale lemnoase (I.P.L. Timișoara), a sticlotexolitului (I. Electroputere Craiova), sau operații de decalotare a produselor din sticlă de menaj (Întreprinderea de sticlă Tomești).

Iată de ce, prezentul capitol abordează probleme de tehnologie de prelucrare atât pentru metale de cît și pentru unele nemetale.

Din economie de spațiu, rezultatele experimentale care au stat la baza trasării diagramelor nu au mai fost prezentate tabelar, iar materialele supuse încercărilor au fost simbolizate astfel : F.C.- furnir de cireș, F.F.- furnir de fag, Pl- placaj din fag, P.E.- placă emailată, ST- sticlotexolit, SI- sticlă industrială.

Materialele metalice s-au simbolii. În conformitate cu standardele în vigoare.

6.1. Stabilirea regimului de tăiere cu laser și jet de gaz ajutător

La tăierea cu laser cu suflare de gaz ajutător procesul distrugerii materialului are loc atât datorită acțiunii termice directe a fasciculului laser focalizat cât și datorită căldurii degajate în timpul reacției exoterme care are loc între materialul supus prelucrării și jetul de gaz, dacă în procesul de tăiere se utilizează un gaz reactiv.

Tăierea materialelor metalice are loc, de regulă, în prezența oxigenului, gaz care, în procesul de oxidare ce are loc, degajă o cantitate însemnată de energie termică.

Căldura degajată se consumă pentru încălzirea, topirea și vaporizarea parțială a materialului, o parte din căldură pierzându-se, în mod preferențial, prin mecanismul de termoconductibilitate.

Schema principalelor fenomene ce apar la interacțiunea radiației laser cu materia este prezentată în fig.3.2.

La tăierea cu laser parametrii de bază ai regimului de prelucrare sînt viteza de tăiere și puterea radiației laser.

Deoarece, pentru o instalație laser, există posibilitatea măsurării rapide a puterii, în relația de calcul a vitezei de tăiere se preferă utilizarea acestui parametru în locul intensității radiației.

În cazul modelului staționar și unidimensional, la tăierea materialelor se poate utiliza cu bune rezultate relația 3.38.

$$v = \eta_0 \frac{I_0}{\rho [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t]} \quad (6.1)$$

Această relație se cere însă a fi adusă la o formă de utilizare practică.

Dacă se ține cont de aportul termic adus prin reacția exotermă a gazului ajutător cu materialul supus prelucrării, relația (6.1) devine:

$$v = \eta_0 \frac{I_0}{\rho [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t - \eta_r C_r]} \quad (6.2)$$

în care: Cr - căldura de reacție,

η_r - randamentul reacției exoterme.

Avînd în vedere că în practică, în mod obișnuit, grosimea materialului (g) supus prelucrării este mai mare decît diametrul spotului focalizat (d_f),

$$g \gg d_f \quad (6.3)$$

este necesar să se considere că prin iradiere nu se luminează o arie de valoare $\frac{\pi d_f^2}{4}$ ci o suprafață înclinată a cărei mărime trebuie calculată.

Pentru calculul ariei acestei suprafețe se consideră modelul geometric prezentat în fig.6.1. Se poate aprecia că suprafața iradiată are valoarea :

$$S = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \overline{O_1T_1} \cdot (\overline{O_1T_1} + \overline{OT}) \quad (6.4)$$

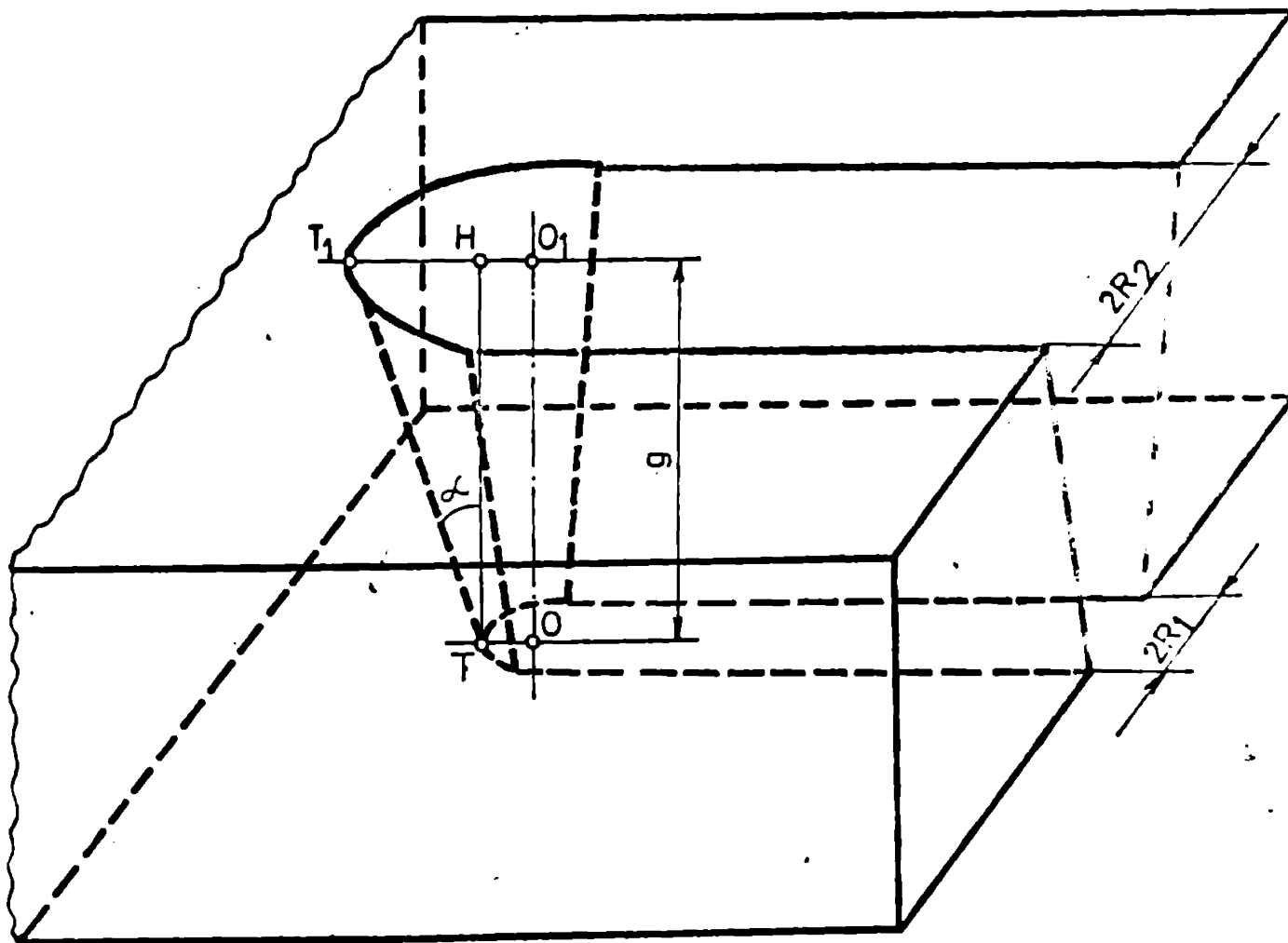


Fig. 6.1. Suprafața iradiată la tăierea laser-gaz

respectiv:

$$S = \frac{\pi}{2} (2R_1 + \overline{T_1 H}) \overline{T T_1} \quad (6.5)$$

Dacă se consideră că unghiul de inclinare al generatoarei suprafeței iradiate este egal cu semiunghiul de convergență a razei laser în sistemul de focalizare utilizat:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2f} \quad (6.6)$$

în care; d -diametrul fascicului laser nefocalizat,
 f -distanța focală a sistemului optic.

Se poate determina aria suprafeței iradiate cu o relație de forma:

$$S = \frac{\pi \cdot g}{8f^2} (4R_1 f + g d) \sqrt{4f^2 + d^2} \quad (6.7)$$

În urma unor constatări practice, se poate aproxima raza R_1 cu cea a fascicului laser focalizat, situație în care, se obține pentru aria formula:

$$S = \frac{\pi g}{8f^2} (4r_f \cdot f + g \cdot d) \sqrt{4f^2 + d^2} \quad (6.8)$$

r_f - raza fascicului laser în focarul sistemului optic utilizat.

Printr-o aproximare mai grosolană se poate utiliza pentru calculul ariei suprafeței iradiate relația :

$$S = \frac{\pi \cdot r_f}{2} \sqrt{r_f^2 + g} \quad (6.9)$$

Dacă se neglijează timpul de instalare al procesului de tăiere și dacă se introduce în relația de calcul a vitezei (6.2) puterea radiației laser, se poate stabili o relație practică de calcul a vitezei de tăiere a materialelor cu laser asistat de jet de gaz sub forma :

$$v = 14,43 \frac{\eta_0 \cdot P}{S \cdot \rho [c(T_v - T_0) + \lambda_v + \lambda_t - \eta_r \cdot Cr]} \quad (6.10)$$

în care: v - viteza de tăiere (m/min),

η_0 - randamentul interacțiunii - se ia egal cu gradul de absorbție al materialului în stare solidă A_S ,

P - puterea radiației laser (W),

S - aria suprafeței iradiate stabilită cu relațiile (6.8) sau (6.9) (mm^2),

ρ - densitatea materialului (g/cm^3),

c - căldura specifică a materialului ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$),

T_V - temperatura de vaporizare a materialului ($^\circ\text{C}$),

T_0 - temperatura mediului ambiant ($^\circ\text{C}$),

λ_V - căldura de vaporizare a mat. (cal/g),

λ_t - căldura de topire a mat. (cal/g),

Cr - căldura de reacție (cal/g),

η_r - randamentul reacției exoterme.

Relația (6.10) propusă pentru calculul vitezei de tăiere a materialului poate fi utilizată și pentru calculul puterii necesare în vederea tăierii unui material de o grosime determinată și admitând o anumită viteză de tăiere.

Ea va fi verificată și comparată, în paragrafele următoare cu viteza obținută experimental.

Un parametru important, care descrie cu simplitate procesul de tăiere cu laser, este așa numitul factor termochimic dat în literatura de specialitate /93,105/ sub forma;

$$\psi = - \frac{\lambda_r}{\rho \cdot c \cdot T_r} \quad (6.11)$$

mărime adimensională în care:

λ_r - căldura de distrugere a materialului,

T_r - temperatura de distrugere.

Dacă în procesul de tăiere nu se utilizează un jet de oxigen și se consideră că distrugerea materialului se realizează prin vaporizare, se obține pentru ψ valoarea - 10, pentru marea majoritate a materialelor.

Dacă consumul energetic în procesul de tăiere este legat de topirea materialului și energia degajată de reacțiile chimice este neglijabilă (λ_r și T_r se înlocuiesc cu λ_t și T_t) se obține pentru ψ valoarea: - 0,4.

Dacă însă aportul energetic al reacțiilor chimice de oxidare este important (caz frecvent întâlnit practic) atunci:

$$- 0,4 < \psi < 5,3$$

(6.12)

Pentru valori ale lui ψ cuprinse în intervalul (1,9 - 5,3) aportul energetic al reacțiilor exoterme este atât de mare încât tăierea devine necontrolată, participarea energetică a reacțiilor exoterme depășește cu mult pe cea a fasciculului laser. Pentru asemenea valori ale lui ψ viteza calculată cu relația 6.10 se mărește în mod corespunzător, astfel încât procesul de tăiere să devină controlabil.

Pentru marea majoritate a materialelor dielectrice, la tăierea cu laser asistat de un jet de aer comprimat, ψ are valoarea;

$$- 1 > \psi > - 2$$

(6.13)

Aceste valori arată că doar o parte a materialului este vaporizată, o contribuție importantă în procesul de tăiere fiindu-i atribuit jetului de gaz care transportă în tăietură vaporii supraîncălziți și picăturile de material topit.

La materialele fenol-formaldehidice (textolit, fibre de sticlă, sticlotextolit, etc) radiația laser transformă materialul într-o masă vâscoasă ce nu poate fi îndepărtată din tăietură nici de către jetul de gaz.

Ca urmare consumul energetic la tăierea acestor materiale este foarte mare iar valorile lui ψ , pentru o temperatură de distrugere de 1000°C sînt;

$$- 5 > \psi > - 10$$

6.2. Unele rezultate experimentale la tăierea cu laser a oțelurilor

Incercările de tăiere ale oțelurilor au fost efectuate asupra unor eșantioane decupate din tablă de OL 37-2n și 20 Cr 130, pe instalația laser cu bioxid de carbon cu circulație transversală a amestecului (cap.4).

În procesul de tăiere s-a folosit un jet de oxigen sub presiune trimis asupra piesei coaxial cu fasciculul laser focalizat.

S-au urmărit în timpul procesului de tăiere următorii parametri: viteza de tăiere, presiunea gazului ajutător, grosimea

maximă a materialului ce se poate prelucra la puterea instalației utilizate (max. 450 W). S-a măsurat variația lățimii tăieturii la intrarea și la ieșirea fasciculului (l_i , respectiv l_e), precum și lățimea zonei afectate termic (colorate) (Z_c).

În toate încercările de tăiere focalizarea radiației laser s-a realizat la suprafața materialului, dispozitivul utilizat pentru prelucrare fiind cel prezentat la paragraful 4.23.

În timpul procesului de tăiere s-a menținut constant interstițiul dintre duza de suflare a gazului și materialul supus prelucrării în limitele unor valori cuprinse între 0,5 și 1 mm.

Au fost efectuate încercări pentru diferite domenii de variație a parametrilor regimului de prelucrare.

a) Presiunea gazului ajutător utilizat (oxigenul) a fost variată în intervalul 0,2 - 3,6 at, din 0,4 în 0,4 at, urmărindu-se influența acesteia și deci a debitului de gaz asupra vitezei de tăiere și a parametrilor geometrici ai tăieturii l_e , l_i și Z_c .

b) Puterea radiației laser, controlată permanent cu ajutorul unui radiometru cu domeniu de măsurare de pînă la 1.000 W, a fost variată din 50 în 50 W în intervalul 150 - 450 W; puterea maximă obținută de instalația fiind de 450 W.

c) Grosimea materialului. S-au utilizat pentru încercări eșantioane din oțel (OL 37-2n) cu grosimi cuprinse între 1 și 8 mm, iar pentru oțelul inoxidabil 20 Cr. 130 cu grosimi de la 0,5 la 2,5 mm. Grosimea maximă a epruvetelor supuse procesului de tăiere a fost limitată de energia disponibilă prin focalizarea radiației laserului. S-a constatat astfel că tăierea tablelor cu grosimi mai mari de 7 mm, respectiv 2,5 mm pentru oțel inoxidabil, nu decurge în mod continuu, obținându-se zone tăiate ce alternează cu zone străpunse parțial. De asemenea, calitatea tăieturii, la aceste grosimi limită, lasă mult de dorit, observîndu-se depuneri pronunțate de material topit pe marginile pereților tăieturii, lățimi ale tăieturii mari și neuniforme, zone extinse de material influențate termic. S-au stabilit astfel limitele maxime posibile de realizat la tăierea celor două materiale cu instalația și în condițiile de experimentare considerate.

d) Viteza de tăiere. Limitele de variație ale acestui parametru au fost stabilite funcție de caracteristicile constructive ale dispozitivului utilizat în vederea realizării operațiilor de prelucrare, funcție de natura și grosimea materialului cît și în funcție de energia radiației. Astfel, pentru OL 37-2n s-au utilizat viteze

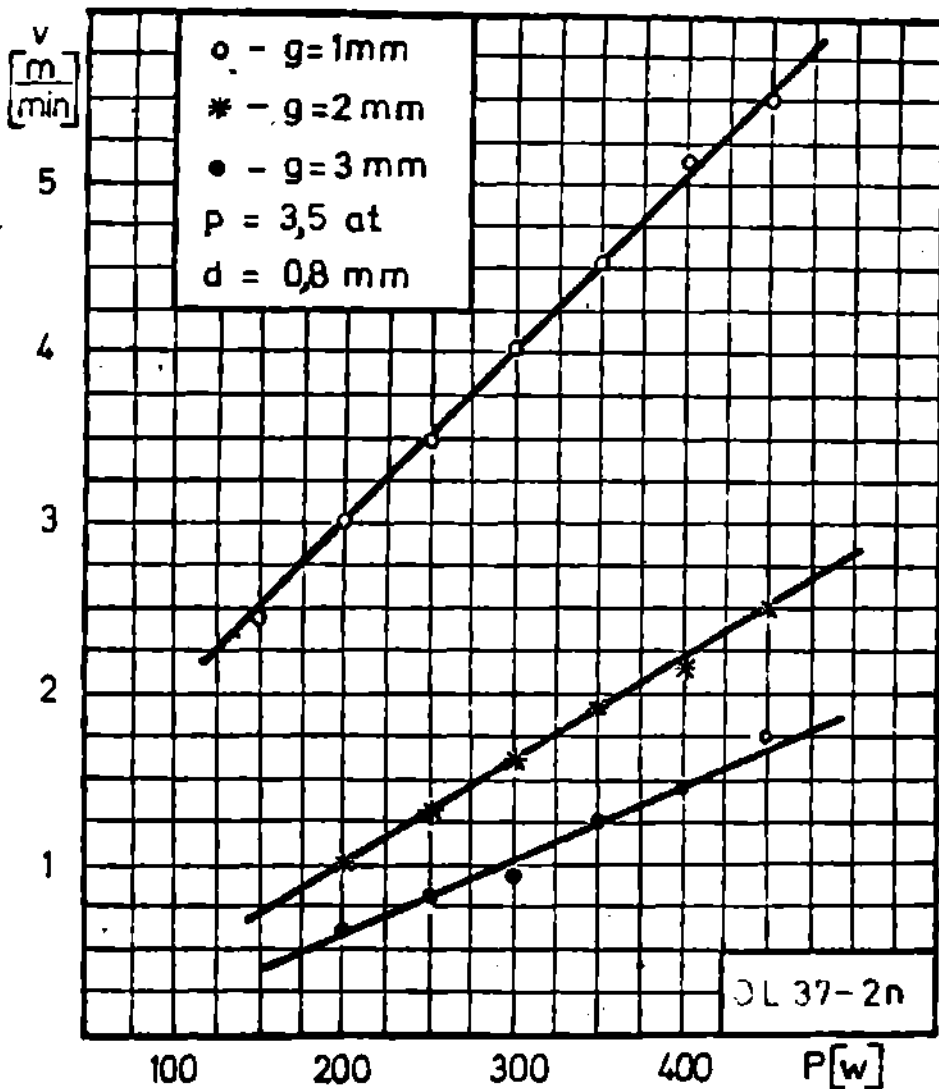


Fig. 6.2. Variația vitezei de tăiere cu puterea laserului

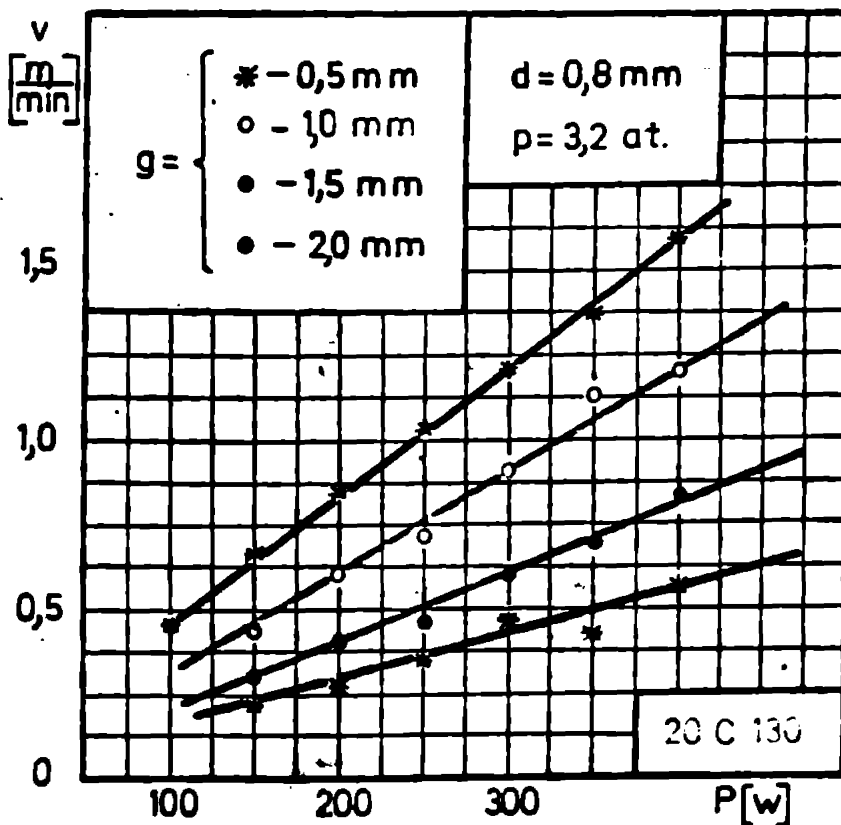


Fig. 6.3. Variația vitezei de tăiere în funcție de puterea laserului

de prelucrare cuprinse în intervalul 0,1 - 6 m/min iar pentru 20Cr130 în intervalul 0,12-1,8 m/min.

Incercările efectuate referitor la dependența vitezei de tăiere de presiunea gazului, ajutor au relevat o creștere a vitezei odată cu creșterea presiunii (debitului) doar pînă la valori ale acesteia de 2 - 2,4 at. Creșterea presiunii peste această valoare nu influențează esențial viteza de tăiere și deci nu se justifică.

Din analiza rezultatelor s-a constatat că dependența vitezei de tăiere funcție de puterea radiației laser este liniară pentru ambele materiale supuse încercărilor (fig. 6.2, 6.3); dependență ce era de așteptat de altfel, analizînd relația 6.10.

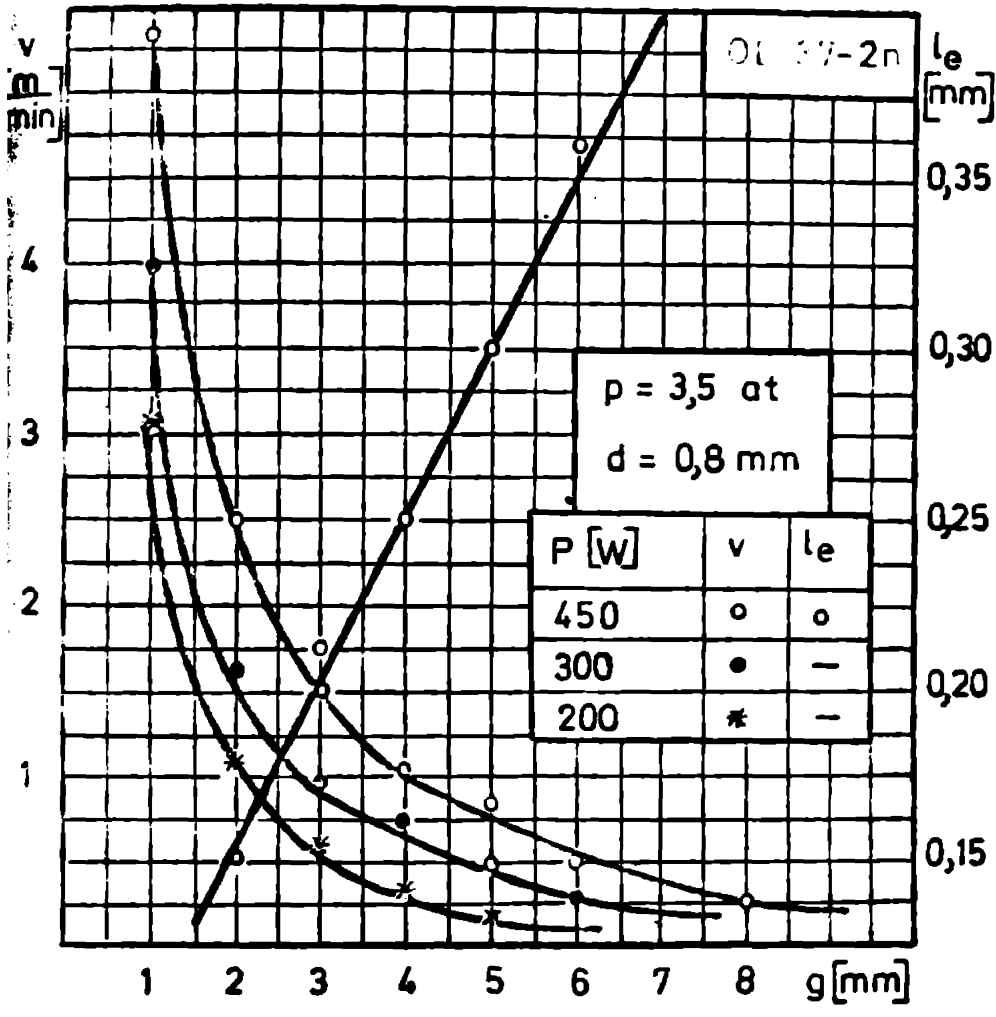


Fig. 6.4. Viteza și lățimea tăieturii pentru diferite grosimi de material

La grosimi mari de material și energii mari ale radiației laser nu este de așteptat ca să crească viteza în același mod, deoarece, pierderile de putere sînt mult mai pronunțate (convecție, radiație, prin norul de vapori etc.). O parte însemnată din material este îndepărtat, în aceste cazuri, prin fenomenul de vaporizare.

Se constată de asemenea că panta dreptelor ce materializează dependența ($\text{tg } \alpha$) se reduce odată cu creșterea grosimii materialului.

Dependența vitezei de tăiere funcție de grosimea materialului (fig. 6.4, 6.5) relevă o variație exponențială, justificată și de faptul că relația 6.10 stabilește o dependență a vitezei funcție de g^2 (pătratul grosimii materialului).

Valorile găsite în urma experimentărilor, valori limită la care tăierea este continuă și are o calitate corespunzătoare, au fost

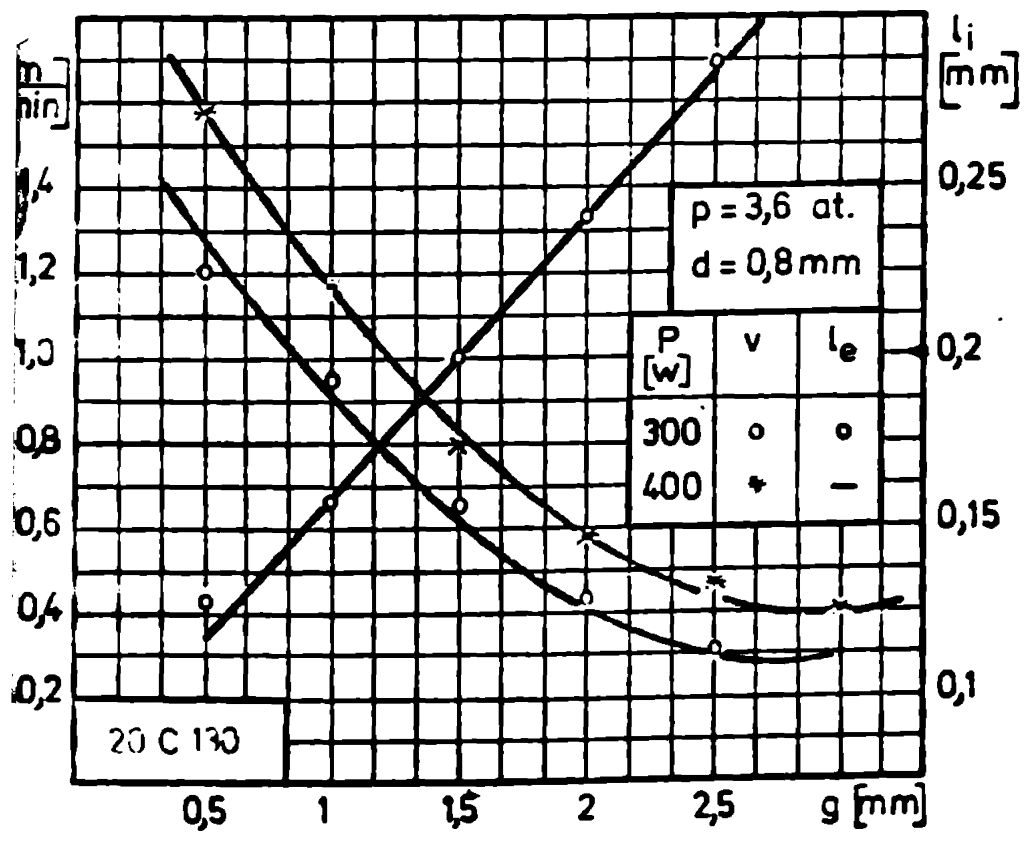


Fig. 6.5. Variația vitezei și a lățimii tăieturii cu grosimea oțelului 20C 130

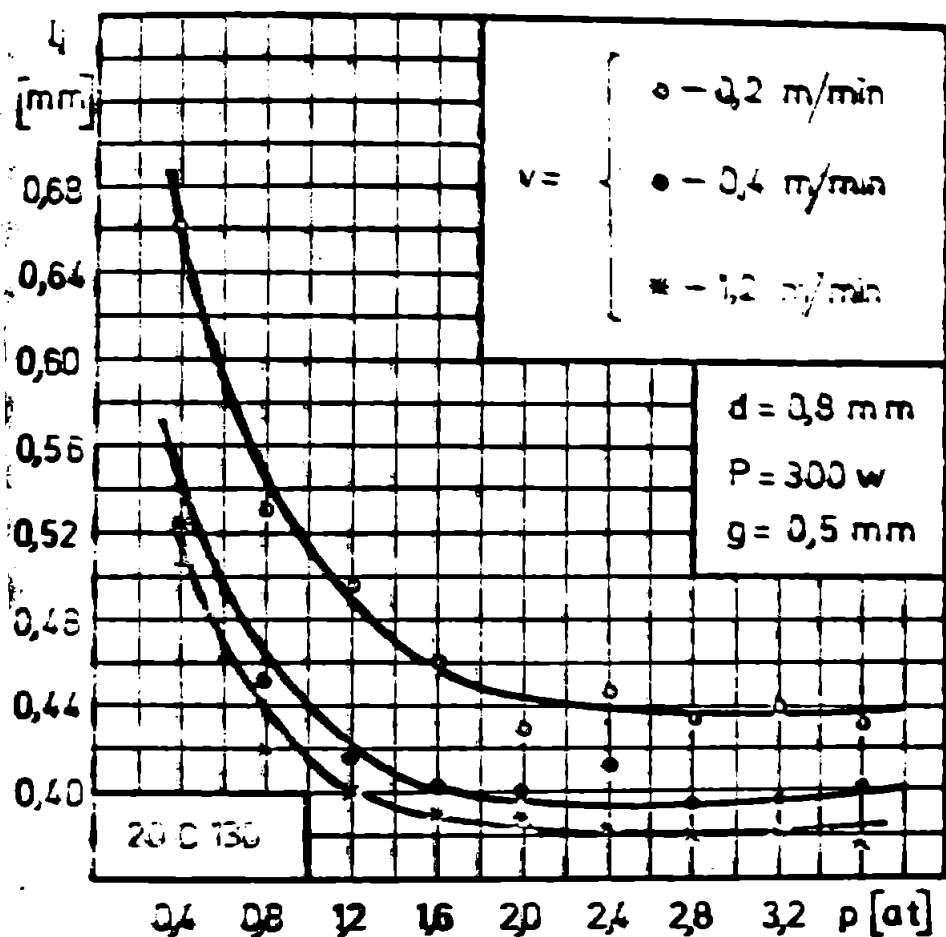


Fig. 8.5. Variația lățimii tăieturii l_1 cu presiunea jetului de gaz

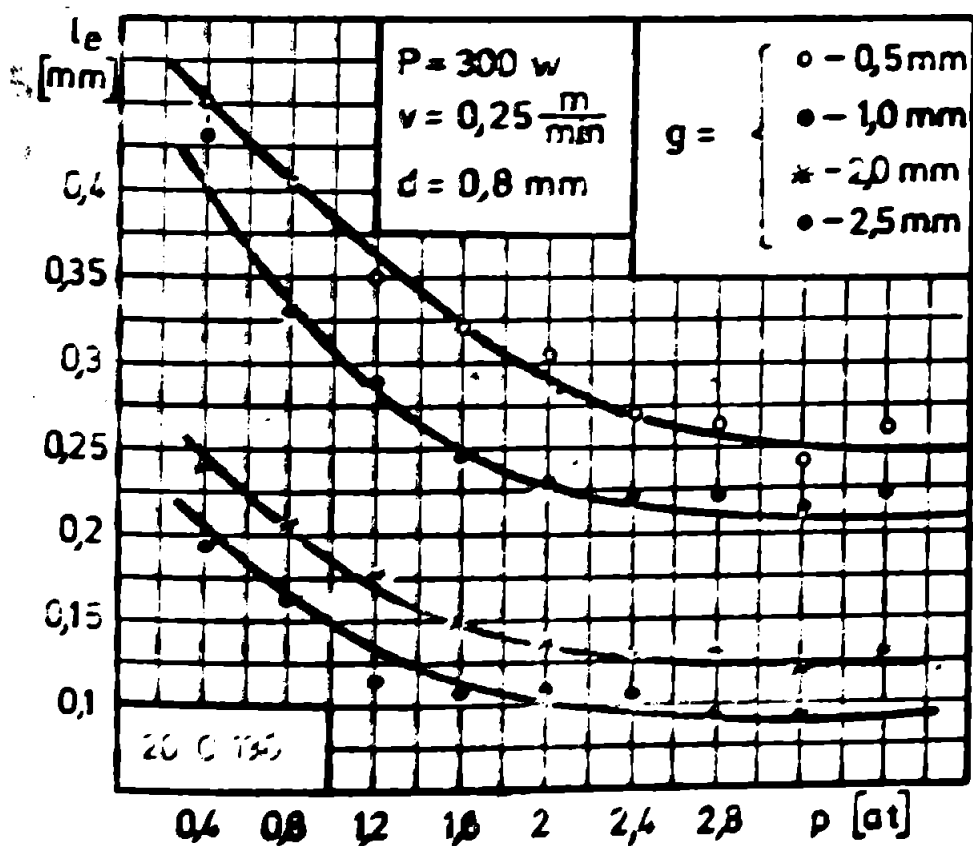


Fig. 8.7. Variația lățimii tăieturii l_e cu presiunea jetului de gaz

comparate cu valoarea calculată cu ajutorul relației 8.12 obținându-se erori de maxim 30%.

Asemenea erori se explică prin faptul că modelul idealizat elaborat pentru procesul de tăiere cu laser pe care se bazează calculul, nu consideră o serie de factori sau pur și simplu îi aproximează, aceștia nefiind încă cunoscuți sau determinați cu exactitate (acțiunea de răcire a jetului de gaz, variația coeficientului de absorbție al materialului în timpul procesului de distrugere etc).

•) Parametrii geometrici ai tăieturii.

S-au măsurat pentru toate încercările efectuate lățimea tăieturii la "intrarea" fascicului laser în material (l_1) la "ieșirea" fascicului (l_e), precum și lățimea

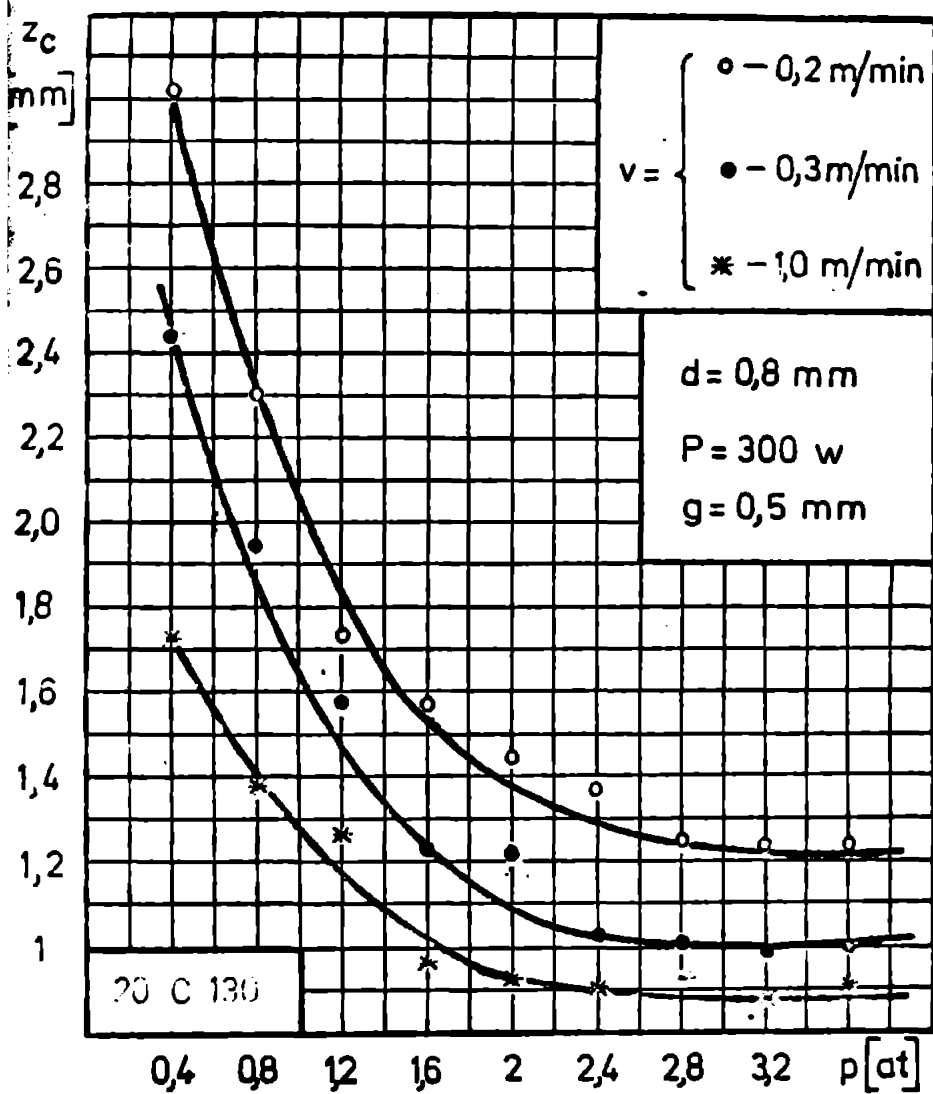


Fig. 6.8. Dependența lățimii zonei afectate termic de presiunea jetului de gaz

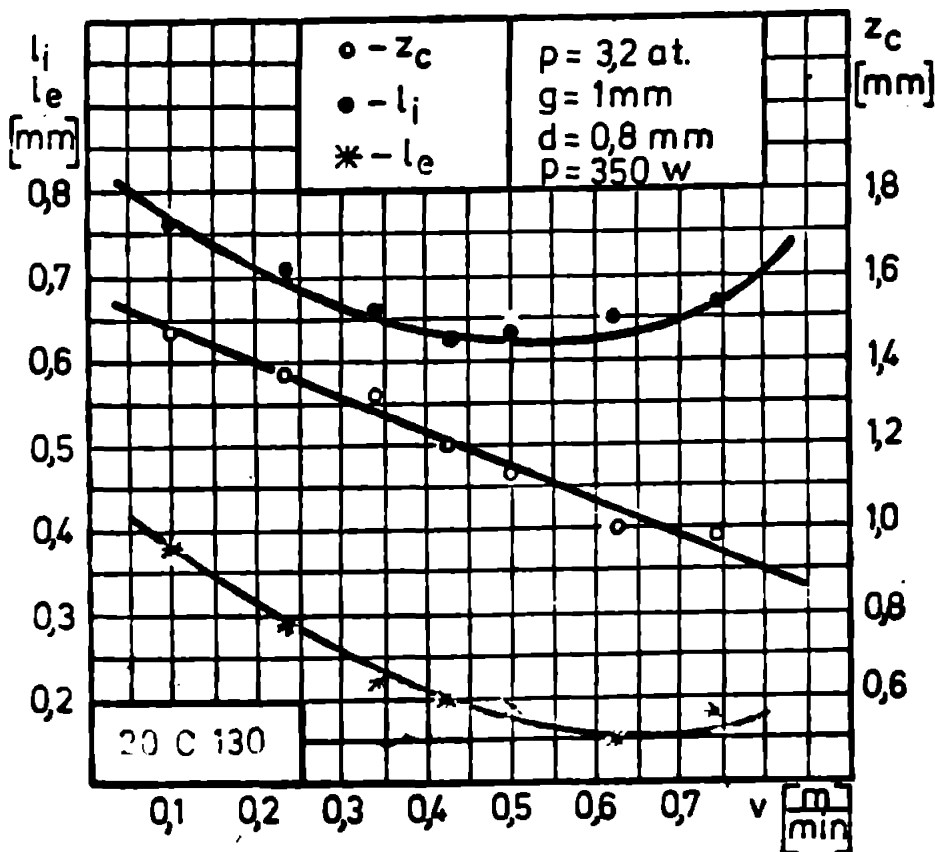


Fig. 6.9. Variația mărimilor geometrice ale tăieturii cu viteza de tăiere

zonei afectate termic (Z_c).

Măsurarea s-a efectuat cu ajutorul unui microscop de atelier a cărui precizie a fost ridicată la valoarea $0,001$ mm prin atașarea unui comparator cu valoarea diviziunii scării de $0,001$ mm.

Unele din rezultatele acestor măsurători au fost reprezentate în diagramele din fig. 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 și 6.10. Parametrul l_i are o variație liniară în raport cu grosimea materialului prelucrat, fenomen explicabil prin aceea că odată cu creșterea grosimii semifabricatului, la aceeași putere a radiației laser, durata de interacțiune a fasciculului este tot mai mare (viteza de deplasare a probei este mai mică), o cantitate tot mai mare de material este topită și îndepărtată.

În fig. 6.6 se reprezintă variația aceluiași parametru pentru diverse presiuni ale gazului ajutător și la diverse viteze de prelucrare.

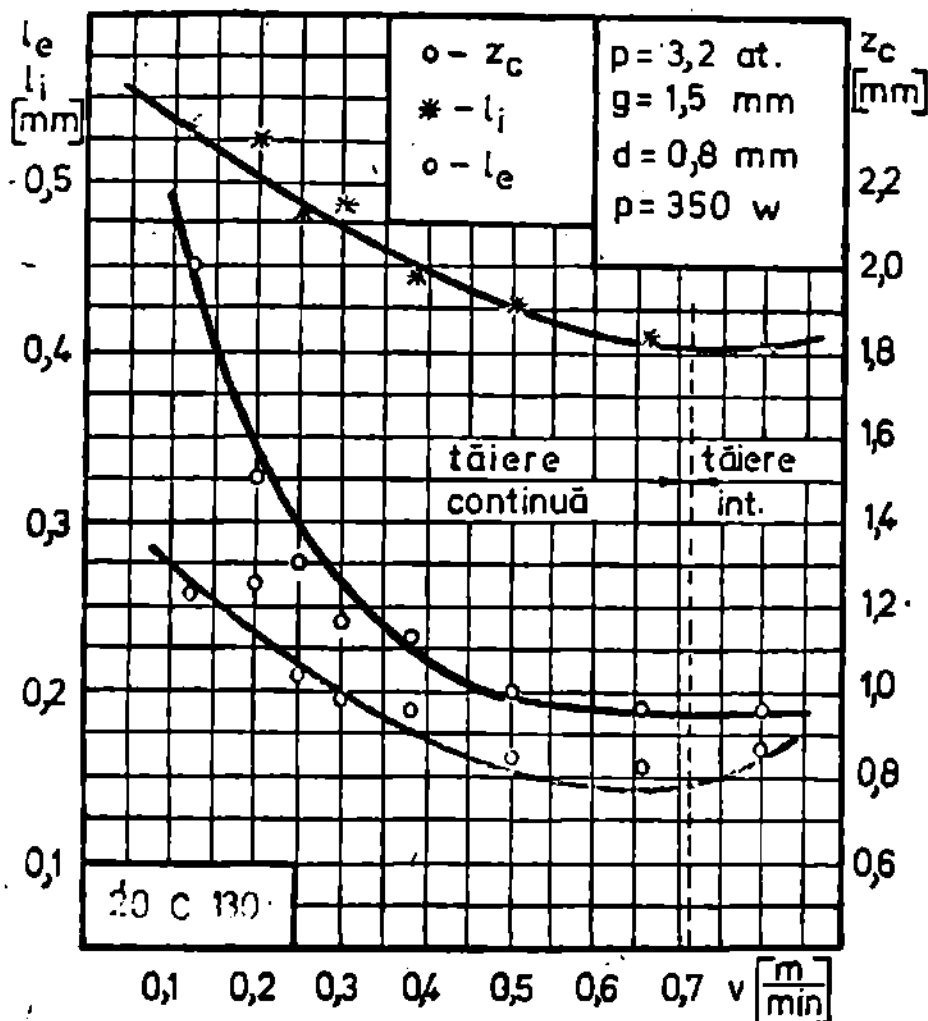


Fig. 6.10. Variația mărimilor geometrice ale tăieturii cu viteza de tăiere

Lățimea tăieturii scade odată cu creșterea presiunii gazului ajutător, până la atingerea unor presiuni de 2 - 2,4 at, valori la care s-a constatat și o stabilizare a vitezei de prelucrare.

Se constată de asemenea că odată cu creșterea vitezei parametrul li își reduce valoarea.

Variații similare se constată și pentru parametrii le și Z_c , presiunea la care valorile acestora se stabilizează fiind între 2,4 și 3,2 at. Odată cu creșterea

grosimii însă, parametrul le își reduce valoarea (fig. 6.7), ceea ce arată că ne apropiem treptat de grosimi la care, pentru puterea dată a instalației laser, tăierea devine discontinuă.

În fig. 6.9 și 6.10 sînt reprezentate variațiile parametrilor geometrice în funcție de viteza de prelucrare pentru două grosimi diferite de material.

În toate cazurile studiate se constată o reducere a valorilor parametrilor odată cu creșterea vitezei, variațiile $li=f(v)$ și $le=f(v)$ prezentînd un minim ne semnificativ conturat. Acest minim se explică prin aceea, că în imediata sa vecinătate tăierea devine discontinuă și ca urmare, în zonele în care materialul a fost tăiat, tăietura are o lățime mai mare decît la o tăiere continuă.

În baza celor cîteva elemente prezentate, pentru condițiile de experimentare considerate; laser multimod cu putere maximă de 450 W, focalizare cu lentilă de Cd Te cu $f=635 \text{ mm}$, jet de oxigen coaxial cu radiația laser focalizată pe suprafața probei; se pot trage următoarele concluzii;

- se pot prelucra eficient cu ajutorul fasciculului laser materialele: Q1 37 2n cu grosime maximă de 8 mm și 20 Cr 130 cu grosimea maximă de 2,5 mm;
- presiunea gazului ajutător nu este necesar să depășească valoarea de 2,4 at., presiuni mai mari necontribuind substanțial la îmbunătățirea calității tăieturii;
- pentru determinarea orientativă a vitezei maxime de tăiere se poate utiliza relația de calcul a vitezei propusă (6.10);
- parametrii geometrici ai tăieturii l_i, l_e și z_c au valori comparabile, uneori sub valorile obținute prin alte tehnici de debitare.

Regimurile optime de prelucrare ale oțelului inoxidabil 20 Cr. 130, în condițiile de experimentare considerate sînt prezentate în tab.6.1. pentru fiecare din grosimile încercate

Material : 20Cr 130 Laser : cu CO ₂ cu circulație transversală Puterea : P max. = 450 W		Focalizare : lentila Cd Te. f = 63,5 mm Gaz ajutător : oxigen Duza pentru suflarea gazului : convergență cu $\alpha = 0,8$ mm.				
Nr. crt.	Grosimea materialului [mm]	Viteza de tăiere [m/min]	Presiunea gazului [at]	Parametri geometrici ai tăieturii		
				l_i [mm]	l_e [mm]	z_c [mm]
1	0,5	1,2	2,4	0,415	0,755	0,655
2	1,0	0,75	2,4	0,557	0,900	0,756
3	1,5	0,66	3,6	0,690	1,050	0,921
4	2,0	0,54	3,2	0,823	1,200	1,075
5	2,5	0,25	3,6	0,956	1,350	1,588

Tab. 6.1. REGIMURI DE PRELUCRARE RECOMANDATE PENTRU OTEL INOXIDABIL 20Cr-130

Inălțimea maximă a microneregulațiilor marginilor tăieturii pentru regimurile indicate în tab.6.1 sînt pentru fiecare caz sub valoarea de 0,05 mm.

6.3. Aspecte tehnologice la prelucrarea materialelor nemetalice

6.3.1. Materialele lemnoase

Studiul prelucrării cu laser a unor materiale lemnoase a constituit obiectul contractului de cercetare științifică Nr.101/31.III.1980 încheiat cu I.P.L. Timișoara în vederea cunoașterii posibilităților de aplicare în practică a acestei noi tehnologii. Pe baza experimentelor efectuate s-au obținut unele elemente de principiu privind aplicarea eficientă a acestui procedeu în întreprindere.

Din cercetările efectuate, se prezintă în acest capitol principalii parametri ai regimurilor de lucru precum și dependența acestora de natura materialului prelucrat.

Vitezele la care s-a realizat prelucrarea, calitatea ireproșabilă a tăieturii obținută prin acest procedeu, la unele materiale, precum și complexitatea geometrică deosebită ce se poate realiza, conduc la o eficiență economică ridicată a acestui procedeu față de metodele clasice de prelucrare utilizate în momentul de față în întreprindere. Rezultatele obținute au determinat sporirea interesului conducerii acestei întreprinderi, astfel că, în momentul de față se duc tratative pentru materializarea unui nou contract de cercetare în valoare de cca 2000.000 lei pentru punerea efectivă în practică a acestei noi tehnologii.

În vederea experimentărilor a fost utilizat laserul cu CO₂ închis, de 100 W, cu funcționare monomod, prezentat în cap.4. S-a ales acest tip de laser deoarece construcția sa și numărul redus de servituți (alimentare cu apă de la rețea și energie electrică), fac posibilă încadrarea s-a facilă într-o linie tehnologică de fabricație.

Laserului i-a fost atașat un radiometru și un dispozitiv de deviere și focalizare a fasciculului, focalizare realizată cu o lentilă concav-convexă din germaniu cu distanța focală $f=37$ mm.

Probele au fost fixate pe masa de prelucrare descrisă în cap.4, masă acționată în mișcare de rotație cu viteză variabilă cuprinsă între 0 și 18 m/min.

Principiul de lucru este similar celui descris în paragraful precedent, distanța dintre duza de suflare a gazului și proba supusă tăierii a fost menținută aproximativ constantă la valoarea de 0,8 mm, la un diametru de ieșire al duzei de 1 mm.

S-au folosit drept gaze ajutătoare aerul comprimat și acroleinul. Măsurările ulterioare precum și analiza calității tăieturii au arătat că natura gazului ajutător nu influențează calitatea tăieturii și nici parametrii de tăiere (se exclude utilizarea în procesul de tăiere a oxigenului). Din aceste considerente pentru ultimele experimentări s-a utilizat doar aerul comprimat.

Presiunea aerului a fost cuprinsă în intervalul 2 - 3 at, interval găsit ca optim în urma unor încercări preliminare.

Au fost încercate următoarele categorii de materiale lemnoase.

- furnire din fag, stejar și cireș într-un strat și în mai multe straturi (max.14);
- placaj din fag de 5 mm grosime;
- P.F.L. emailat pe o față de 5 mm grosime;
- P.F.L. dur emailat pe ambele fețe de 5 mm grosime;
- P.A.L. furniruit pe două fețe de 13 mm grosime;
- P.A.L. malaminat pe două fețe de 16 mm grosime;
- P.A.L. normal de 16 mm grosime.

S-a apreciat calitatea tăieturii prin măsurarea lățimii tăieturii la "intrare" și "ieșire" fasciculului laser (li,le) precum și a lățimii zonei colorate (Z). Tăieturile au fost măsurate pe un microscop de atelier a cărui precizie de citire a fost mărită de la 0,01 mm la 0,001 mm prin atașarea la sania longitudinală a unui comparator cu V.D. scării de 0,001 mm.

Probele s-au măsurat în 5 secțiuni distincte, s-au eliminat valorile extreme ale măsurărilor și s-a luat în considerare valoarea medie aritmetică.

6.3.1.1. Prelucrarea furnirelor

Prelucrarea furnirelor prezintă o importanță deosebită mai ales în vederea realizării interziselor produselor de mobilier. Configurația uneori deosebit de complicată (fig.6.11) precum și mărimea mare a prelucrării, prelucrare care în momentul de față se realizează manual, determină prețul de cost ridicat al produselor acestui gen.

Prelucrarea cu fascicul laser asociată cu o masă port obiect

prevăzută cu sistem de copiere a formei intarsiei, poate înlocui cu succes munca manuală și reduce considerabil prețul de cost.

Pentru înlocuirea vechii tehnologii s-a impus determinarea nui regim de prelucrare cu laser la care lățimea tăieturii să fie

mai mică, cel mult egală cu cea obținută pe cale manuală (intarsiile se prelucreză în majoritate cu profile conjugate și din esențe diferite) iar zona colorală să fie cât mai redusă, de preferință nesecizabilă cu ochiul liber.

a) Tăierea furnirelor într-un singur strat.

Aceste cercetări

s-au efectuat în vederea stabilirii modului de variație a lățimii tăieturii odată cu modificarea vitezei de deplasare a probei, (fig.6.12) pentru o putere a radiației laser de 100 W. Incercările

au scos în evidență că în cazul focalizării radiației laser pe suprafața probei, se obțin lățimi ale tăieturii mai mari în zona de "intrare" decât în zona de "ieșire", fenomen care dispare la utilizarea unor lentile cu distanța focală de peste 100 mm, (lentile la care "lungimea focarului" este mult mai mare).

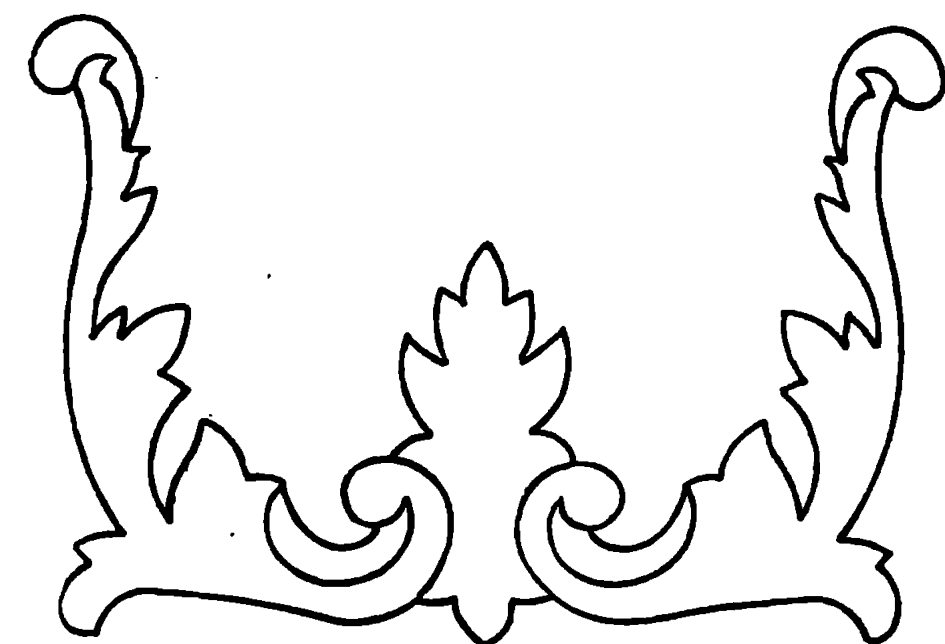


Fig. 6.11 PROFILUL UNEI INTARSII DIN FURNIR

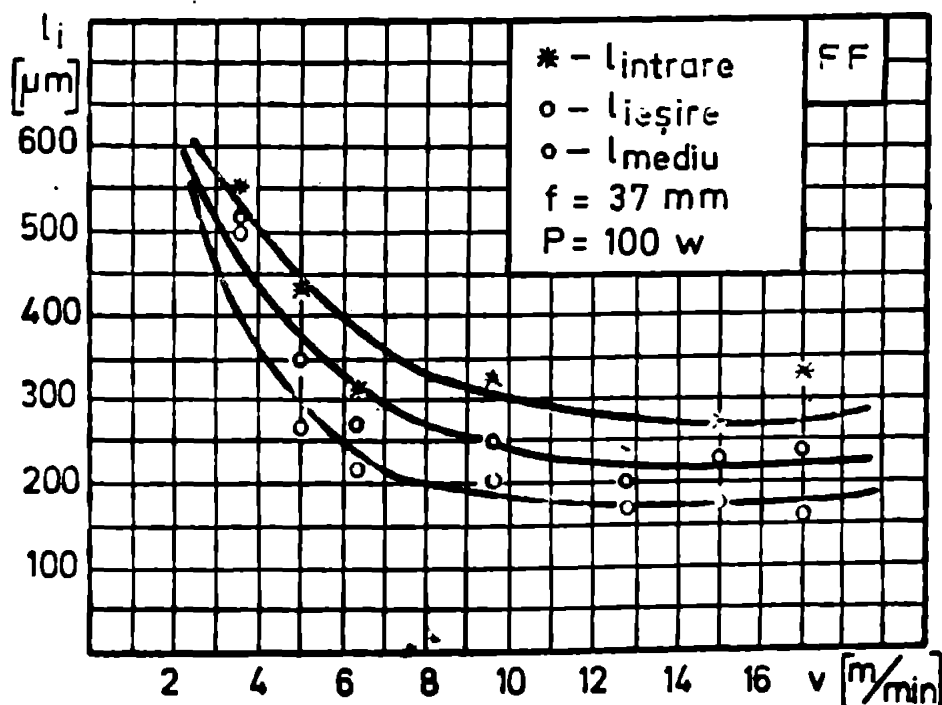


Fig. 6.12. Variația lățimii tăieturii funcție de viteză

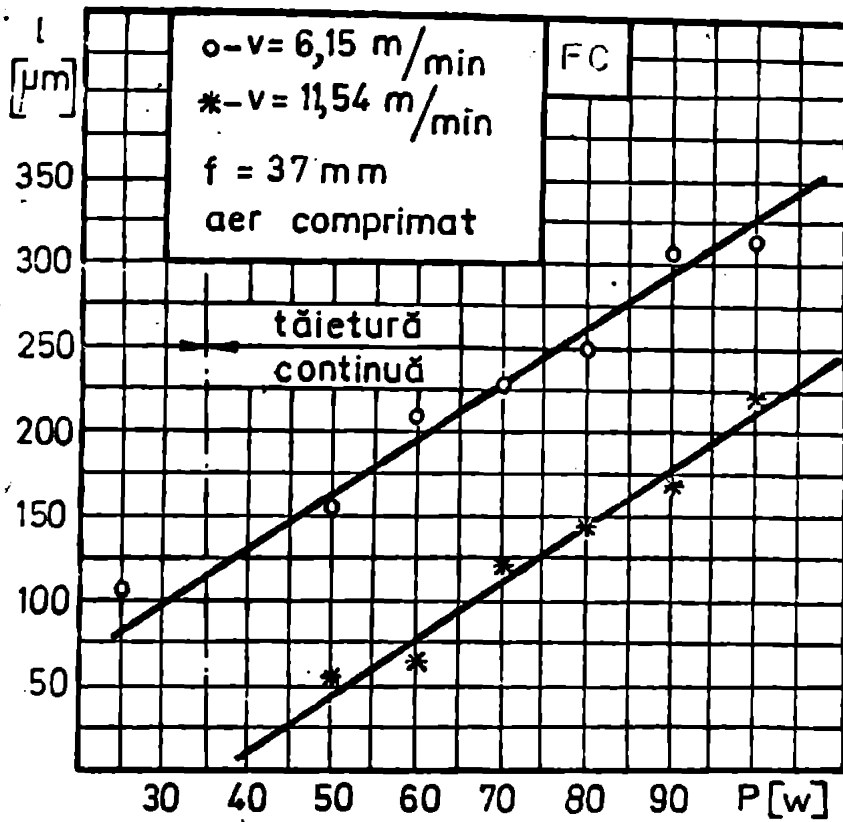


Fig. 6.13. Variația lăţimii medii a tăieturii funcție de puterea laserului

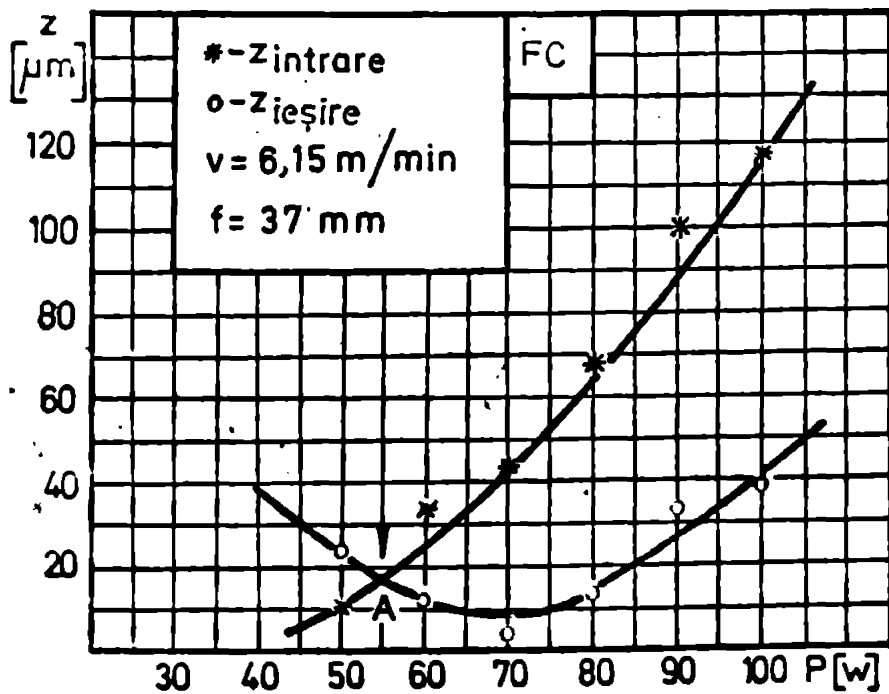


Fig. 6.14. Influența puterii laserului asupra lăţimii zonei colorate

Se constată de asemenea, o reducere a lăţimii tăieturii odată cu creşterea vitezei de tăiere, pînă la o anumită valoare, de la care creşterea vitezei nu mai afectează lăţimea tăieturii; viteza optimă pentru o tăiere stabilă în cazul furnirului de fag (P.F.) se situează în jurul valorii de 14 m/min. Limita de la care tăierea devine intermitentă este de 18 m/min.

Pentru a stabili influența puterii laserului asupra calității tăieturii s-au făcut încercări de tăiere cu mai multe viteze. Din rezultatele obținute se constată că lăţimea tăieturii variază liniar cu variația puterii. În fig.6.13 se prezintă variația lăţimii tăieturii în funcție de putere în cazul unui furnir de cireş. Creşterea lăţimii tăieturii se datorează surplusului de energie pe care o conține semnalul laser. La viteze de 6,15 m/min pragul de putere de la care tăierea devine continuă, pentru furnirele din cireş și fag, este de oca 35 W, iar pentru furnirele de stejar de oca 45 W.

Obținerea unor tăieturi de finețe maximă și la un consum minim de energie, pentru această viteză, se realizează la puteri ale laserului de 40 - 50 W.

Pentru același furnir, la viteza de 11,54 m/min, deci aproape dublu, și puteri ale laserului de 50 - 55 W, se obține o tăiere continuă de finețe foarte ridicată.

Având în vedere că puterea unei instalații scade în limitele celor 1.000 ore de funcționare asigurate din construcție cu cca 40% din valoarea sa inițială, se poate considera că laserul monomod închis de 100 W poate fi utilizat cu succes la tăierea furnirelor într-un singur strat; amortizarea cheltuielilor de procurare a instalației laser făcându-se prin creșterea productivității și calității produselor.

La tăierea cu laser a furnirelor trebuie să se țină seama și de efectul nefavorabil care se poate produce asupra marginilor tăiate prin apariția unor zone colorate. Pentru evitarea acestei influențe se impune stabilirea puterii optime, respectiv a vitezei de tăiere. În fig. 6.14 se prezintă influența puterii laserului asupra lățimii zonei colorate. Se observă că la viteza de tăiere de 0,15 m/min, lățimea zonei colorate la "intrarea" și "ieșirea" fasciculului laser determină un punct optim de prelucrare -A- situat la o putere de cca 55 W, punct în care lățimea zonei colorate, măsurată la partea de "intrare" respectiv la partea de "ieșire" a fasciculului are aceeași valoare. Optimul constatat corespunde aproximativ pragului de putere de maximă finețe a tăieturii precizat anterior.

Colorația zonei afectate termic, variază de la maro foarte deschis, aproape nesensibil, până la negru. Variația culorii marginilor tăieturii depinde de esența lemnoasă și în mare măsură de parametrii regimului de tăiere. Energiile prea mari ale radiației determină o ușoară carbonizare a marginilor, carbonizare care ar putea fi utilizată în tehnica intarsiilor pentru sporirea efectului estetic.

b) Prelucrarea pachetelor de furnire

Dacă la prelucrarea furnirului într-un singur strat esența acestuia nu prezintă o importanță deosebită, la prelucrarea cu laser a pachetelor de furnir apare o diferențiere clară a calității tăieturii atunci când în structura pachetului intră esențe diferite. Dintre furnirele supuse experimentărilor diferențieri esențiale prezintă stejarul.

Unele rezultate experimentale privind tăierea cu laser a pachetelor de furnire sînt prezentate în tab.6.2. Puterea instalației laser, măsurată în timpul încercărilor, a fost de 100 W.

Nr. crt.	Nr. de straturi	Structura pachetului			Viteza de tăiere [m/min]	Lățimea tăieturii [mm]	Nr. straturilor tăiate		Aspectul marginilor tăieturii
		F	C	S			complet	parțial	
1	14	7	7	-	0,66	0,43	9	2	negru
2	14	7	7	-	0,38	0,515	14	-	negru
3	14	8	-	6	0,22	0,507	13	1	arsă la stejar
4	14	8	-	6	0,32	0,551	9	4	arsă la stejar
5	14	8	-	6	0,29	0,509	11	3	arsă la stejar
6	14	7	7	-	6,15	0,55	2	-	maro deschis

Puterea radiației laser : P = 100 W/

Tab. 6.2. TĂIEREA PACHETELOR DE FURNIRE DE ESENTE DIFERITE

Se constată că la pachetele fag-cireș, la viteze avînd valoarea sub 0,4 m/min se realizează tăierea completă, marginea tăieturii rămînd însă neagră. Se observă de asemenea, fenomene de afumare a suprafețelor frontale ale foliilor de furnir din pachet. Aceste fenomene pot fi puse pe seama faptului că eliminarea produselor de ardere se face mult mai dificil decît în cazul prelucrării furnirului într-un singur strat. Vaporii supraîncălziți de material ars rămîn timp mai îndelungat în tăietură și difuzează printre foliile de furnir favorizînd astfel carbonizarea marginilor acestora.

Afumarea suprafeței frontale a plăcilor din pachet se pune și pe seama compactării lor dificile datorită rigidității scăzute a acestora, compactare care creează spații intermediare în care pătrund produsele de ardere antrenate de gazul sub presiune utilizat.

Rezultate superioare sub acest aspect, s-au obținut prin umectarea prealabilă a foliilor de furnir sau/și prin introducerea

între straturile de furnir a unor foițe subțiri de hîrtie.

De o deosebită importanță, la prelucrarea pachetelor de furnir, este valoarea distanței focale a lentilei utilizate. În cazul analizat, valoarea teoretică a așa numitei "lungimi a focarului" a fost de 2,56 μm . Cum grosimea pachetului de furnire supus prelucrării era cu mult mai mare, prelucrarea în aceste condiții este improprie. Din acest motiv, se recomandă pentru tăierea pachetelor de grosime mai mare sau a materialelor groase, lentile cu distanța focală de cel puțin 200-250 mm, lentile la care "lungimea" teoretică a focarului este cu mult mai mare.

Pe lângă asigurarea unor condiții de focalizare corespunzătoare, pentru pachetele de furnire, se impune o alegere judicioasă a esențelor și o compactare foarte bună.

6.3.1.2. Prelucrarea placajului din fag de 5 mm grosime

Experimentările realizate cu acest material, utilizînd laserul monomod de 100 W, au scos în evidență unele dependențe ale parametrilor regimului de tăiere asemănătoare cu cele de la prelucrarea furnirelor. Astfel, lățimea tăieturii în placaj scade liniar cu creșterea vitezei de tăiere, obținîndu-se, pentru viteza de tăiere de cca 0,8 m/min, o finețe maximă a tăieturii (fig. 6.15). Prin creșterea vitezei peste această valoare calitatea tăieturii se înrăutățește, iar peste viteza de 1 m/min nu se mai produce o tăiere continuă.

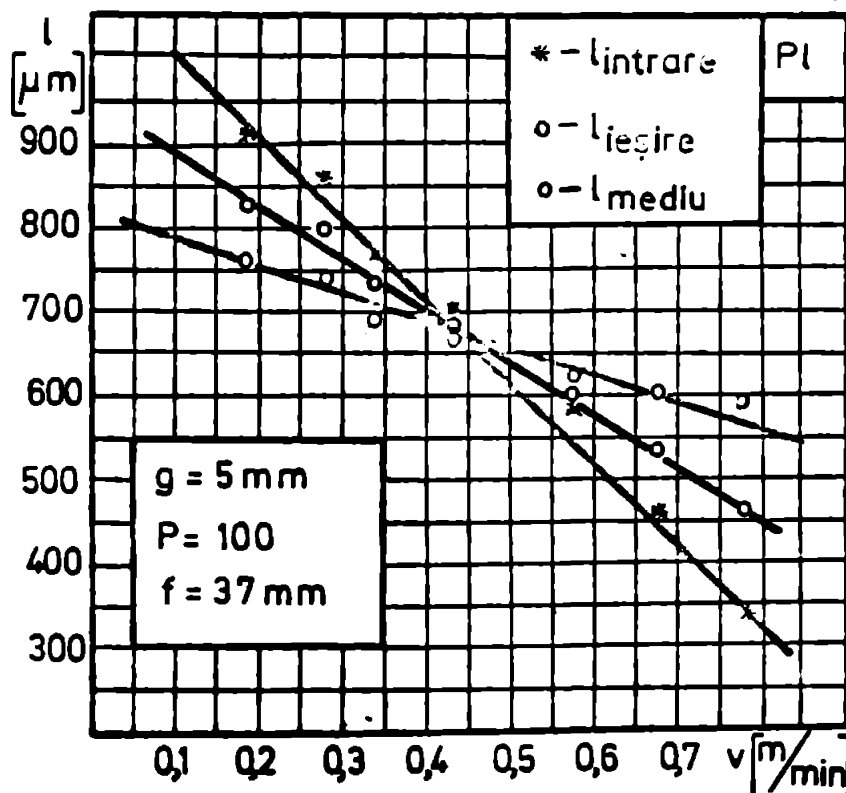


Fig. 6.15. Influența vitezei de tăiere asupra lățimii tăieturii

Constatările corespund laserului folosit (100 W) și unei distanțe focale a lentilei de 37 mm. Din datele bibliografice și constatările efectuate, utilizarea unei lentile cu distanța focală mai mare, permite obținerea unor tăieturi de finețe mai ridicată și cu zone carbonizate mult mai reduse. De asemenea, viteza de tăiere

se poate mări foarte mult prin folosirea unui laser de putere mai mare.

In fig.6.16 se prezintă variația lățimii tăieturii în funcție de puterea radiației laser, la o viteză de tăiere de 0,25 m/min.

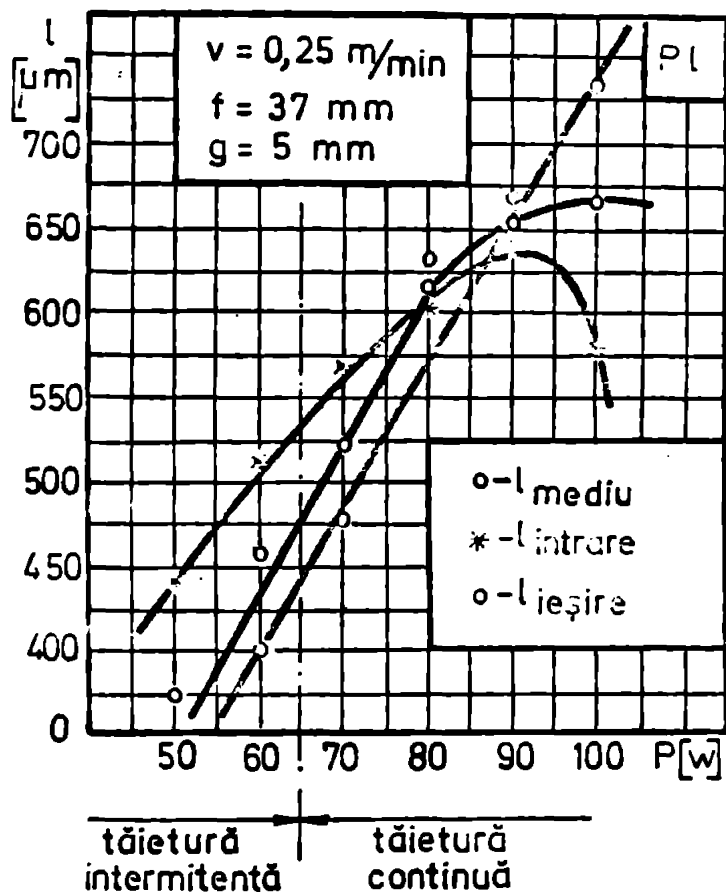


Fig. 6.16. Influența puterii laserului asupra lățimii tăieturii

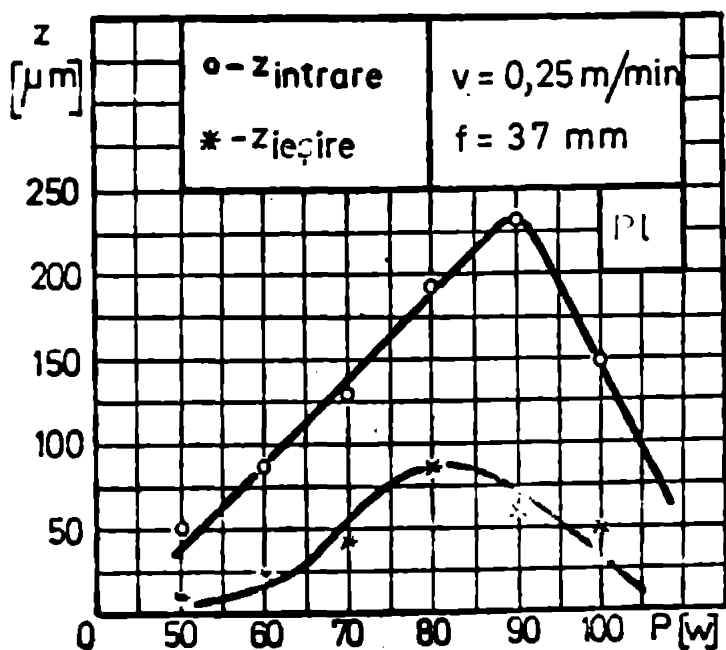


Fig. 6.17. Variația lățimii zonei colorate cu puterea laserului

Dacă se analizează valoarea medie a lățimii tăieturii, mai concludentă datorită inexactității reglării probei în focar, se constată o variație aproape liniară la puteri mici, pentru ca, pe măsura creșterii puterii această variație să devină nesemnificativă. La puteri ale radiației laser superioare valorii de 80 W, lățimea tăieturii este relativ mare, ceea ce arată existența unui excedent de energie. Se obține astfel o margine a tăieturii cu urme evidente de corborizare. Lățimea zonei corborizate (Z) crește odată cu creșterea puterii laserului (fig.6.17), atât la "intrarea" cât și la "ieșirea" fasciculului, atingând o valoare maximă la o putere de cca 85 W. Așa cum reiese din fig.6.16 și 6.17 la tăierea cu laserul monomod de 100 W a placajelor de 5 mm grosime, se obțin rezultate bune dacă se depășește pragul de putere pentru tăierea continuă (cca 65 W la viteza analizată). Se obțin tăieturi a căror lățime este mult sub valoarea celor obținute pe cale

mecanică, iar zona carbonizată, (max. 230 μm), în marea majoritate a cazurilor, nu deranjează.

6.3.1.3. Prelucrarea plăcilor fibrolemnoase emailate

P.F.L.-ul emailat prezintă particularitatea că are o suprafață emailată netedă și lucioasă iar cealaltă suprafață prezintă neregularități pronunțate. De aceste particularități trebuie să se țină seama la stabilirea tehnologiei de tăiere cu laser. La încercările efectuate asupra P.F.L.-ului emailat (alb) pe o singură față s-au obținut rezultate superioare atât sub aspectul productivității cât și sub aspectul calității tăieturii atunci când proba s-a aflat cu fața emailată spre lentila de focalizare.

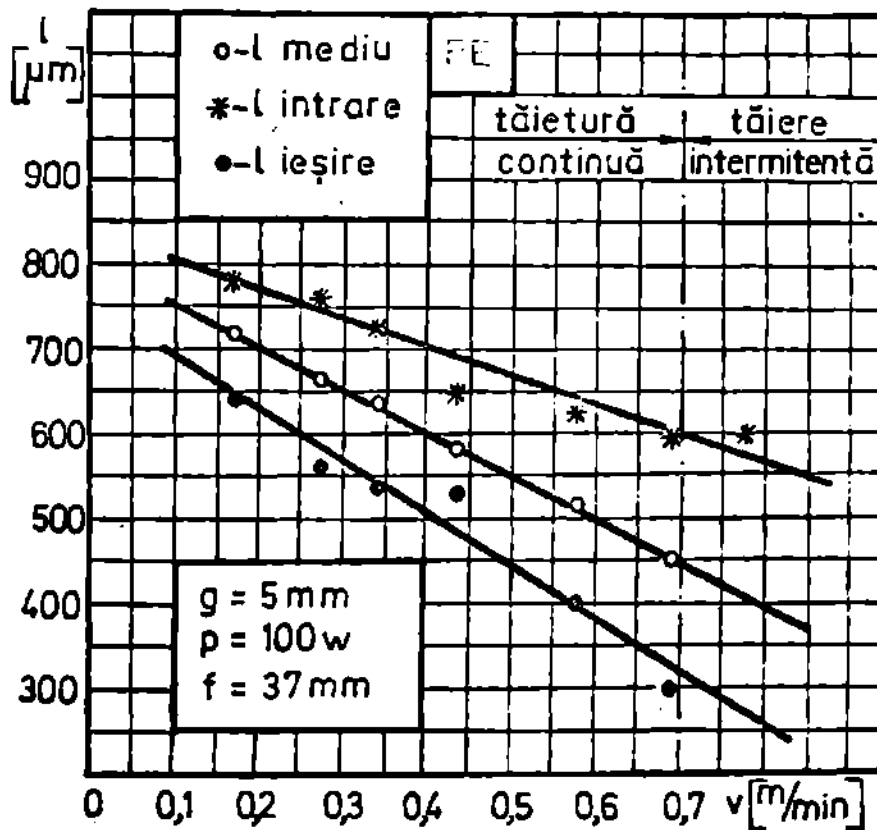


Fig. 6.18. Variația lățimii tăieturii funcție de viteza de tăiere

În fig. 6.18 și 6.19 se reprezintă variația lățimii tăieturii la "intrarea" și "ieșirea" fasciculului laser în funcție de viteza de prelucrare și respectiv puterea laserului.

Ca și în cazul placajului, la viteza de tăiere analizată, tăietura este continuă la depășirea pragului de putere de 65 W. Lățimea tăieturii crește liniar cu creșterea puterii.

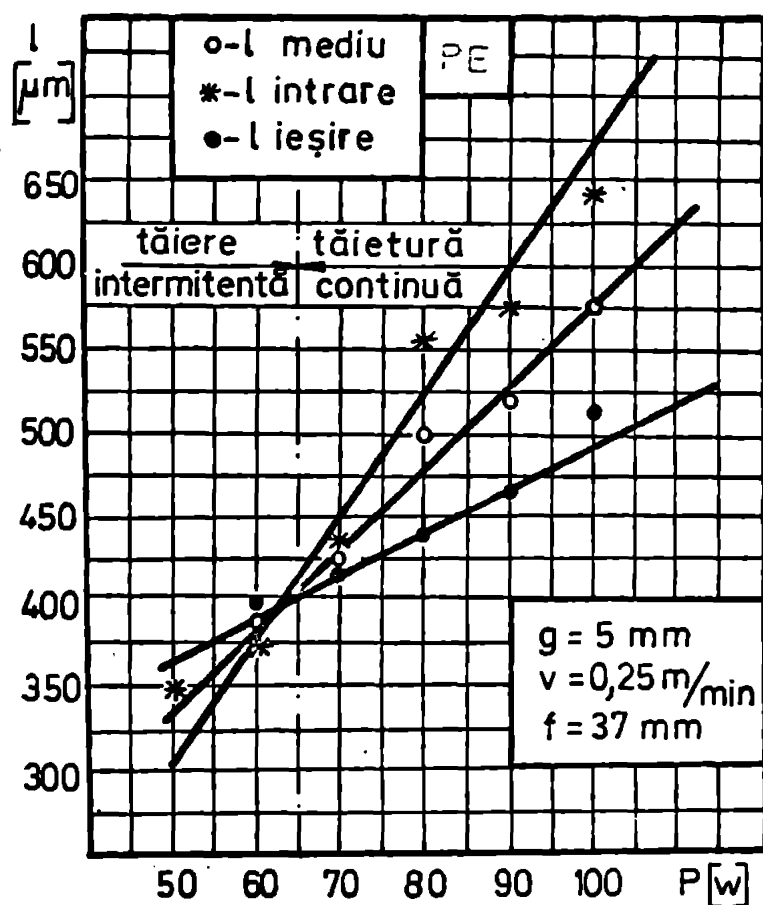


Fig. 6.19. Variația lățimii tăieturii funcție de puterea laserului

Pentru puterea maximă a instalației utilizate (100 W) se obțin tăieturi continui până la o viteză de 0,7 m/min, peste care valoarea proba este tăiată cu intermitență.

Marginea tăieturii se carbonizează și la acest material, valoarea maximă a acestei zone carbonizate fiind, ca și în cazul placajului, de 0,25 mm.

6.3.1.4. Unele concluzii privind tăierea cu laser a materialelor lemnoase

Tăierea cu laser a materialelor lemnoase se dovedește deosebit de eficientă în deosebi la prelucrarea furnirelor în vederea realizării intarsiilor.

În momentul de față aceste intarsii se obțin prin prelucrarea manuală cu pânză de țraforaj, în pachete ce conțin un număr variabil de straturi (max.10) vitezele de lucru realizate sînt de 0,05 - 0,1 m/min.

Dacă se consideră numărul maxim de straturi prelucrate simultan 10 - viteza de prelucrare pe folia individuală de furnir este cuprinsă (funcție de configurația desenului intarsiei) în intervalul 0,5 - 1 m/min.

Față de această valoare, cu un laser cu CO₂ monomod de 55 W se obțin viteze optime de tăiere de 11 m/min, în aceleași condiții de calitate ale tăieturii și indiferent de configurația desenului intarsiei.

Din cercetările și experimentările efectuate se constată că (cu ajutorul laserilor utilizați):

- tăierea furnirelor într-un singur strat se poate face în condiții optime cu viteze de până la 11,5 m/min la o putere a laserului de 50 - 55 W, lățimea tăieturii fiind de 0,1 - 0,3 mm iar zona colorată termic de cca 0,03 mm;

- la puterea de 100 W se pot atinge viteze de tăiere optime de 18 m/min;

- pachetele de furnire se prelucreează mai dificil, vitezele de prelucrare nedepășind 0,4 m/min, la o alegere convenabilă a esențelor;

- față de prelucrarea manuală a furnirilor, la prelucrarea cu laser se obțin viteze de prelucrare de 10 - 15 ori mai mari și lățimi ale tăieturii de cca 2 ori mai mici;

- placajul și PFL-ul emailat de 5 mm pot fi tăiate cu laserul de 100 W la viteze de cca 0,7 m/min, lățimea tăieturii fiind de 0,4 - 0,6 mm iar zona carbonizată de 0,2 - 0,3 mm (la tăierea mecanică lățimea tăieturii este de 3 mm);

- tăierea poate fi executată după orice profil (asigurând viteză constantă de deplasare a probei);

- pentru realizarea prelucrării se necesită instalație de aer comprimat deoarece prelucrarea se realizează în prezența unui jet de aer;

- pentru evacuarea fumului rezultat în urma prelucrării se necesită o instalație de aspirație.

6.3.2. Prelucrarea cu laser a sticloteolitului

Incercările de prelucrare a sticloteolitului au fost executate în baza contractului de cercetare științifică Nr.01/11.I. 1976 încheiat cu Institutul de Cercetări și proiectări Electroputere-Craiova.

Din aceste considerente, experimentale s-au realizat pe instalația laser cu CO₂ (produsă de IFTAR București) de tipul : "cu tuburi în Z" aflată în dotarea Institutului din Craiova.

Laserul cu CO₂ cu tuburi în Z a fost exploatat la o putere de ieșire multimod de 250 W, devierea și focalizarea fasciculului laser realizându-se cu oglindă din cuarț depusă cu strat de aur și respectiv cu lentilă din Cd Te cu distanța focală $f=63,5$ mm, focalizarea radiației laser făcându-se la suprafața probei.

Probele supuse experimentărilor au fost deplasate în fața fasciculului focalizat cu ajutorul unei mese cu deplasare longitu-

dinală cu viteză variabilă în trepte în limitele 0,3-0,65 m/min.

Pentru suflarea gazului ajutător a fost utilizată o duză convergentă cu diametrul de 1 mm exploatată în regim critic de curgere a gazului, distanța dintre duză și piesă fiind menținută aproximativ constantă la valoarea de 1 mm.

Materialul supus încercărilor, sticlotextolitul, este obținut din țesătură din fibre de sticlă legată cu liant organic din rășină epoxidică DINOX 110E. Finețea țesăturii descrește pe măsura creșterii grosimii materialului.

Au fost supuse încercărilor următoarele grosimi de material: 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 și 4 mm. Pentru tăiere s-au utilizat drept gaze ajutătoare: azotul, heliul și aerul comprimat la presiuni cuprinse între 1 și 3,5 at.

Drept parametrii geometrici ai tăieturii au fost măsurați:
- lățimea medie a tăieturii (l_m), considerată ca medie aritmetică între lățimea la intrarea fasciculului și cea de la ieșirea acestuia din piesă;

- Zona afectată termic (Z) considerată în același manieră ca și lățimea medie a tăieturii;

- înălțimea microneregularităților marginilor tăieturii (h).

În funcție de valoarea parametrului h s-a catalogat și simbolizat în reprezentările din figurile 6.20 - 6.25 calitatea tăieturii astfel:

$h \leq 0,05$ mm - tăietură fină, :

$h > 0,05$ mm - tăietură rugoasă,

stabilindu-se pentru fiecare caz în parte domeniul de prelucrabilitate al materialului în funcție de viteza de tăiere și presiunea gazului ajutător utilizat.

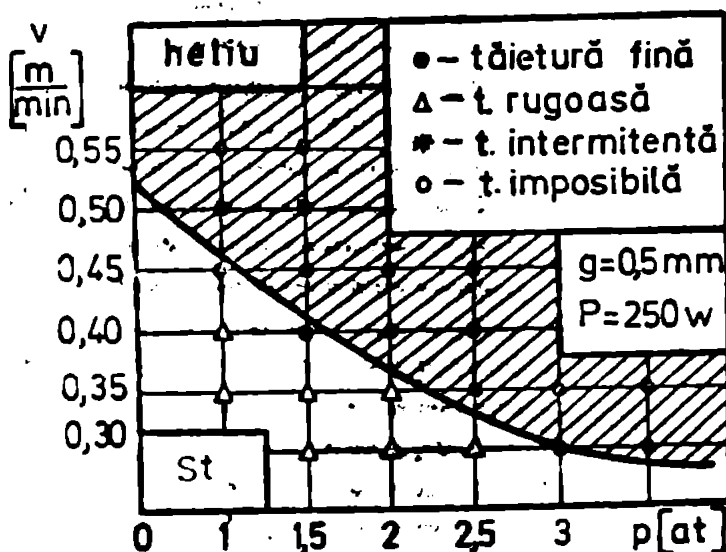


Fig. 6.20. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

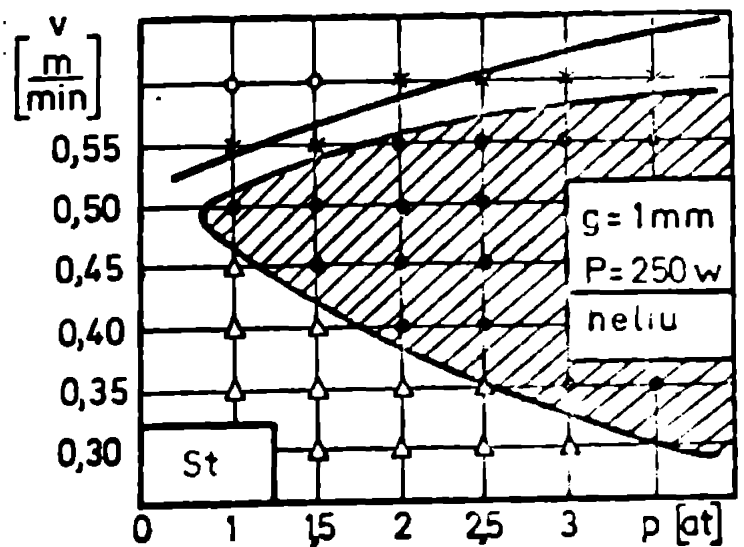


Fig. 6.21. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

În fig.6.20; 6.21; 6.22 și 6.23 sînt prezentate aceste dependențe atunci cînd s-a utilizat drept gaz ajutător heliu.

Se observă că pe măsură ce crește grosimea materialului supus prelucrării domeniul de prelucrabilitate, în condiții calitative corespunzătoare, se îngustează și se deplasează în zona vitezelor mici de tăiere.

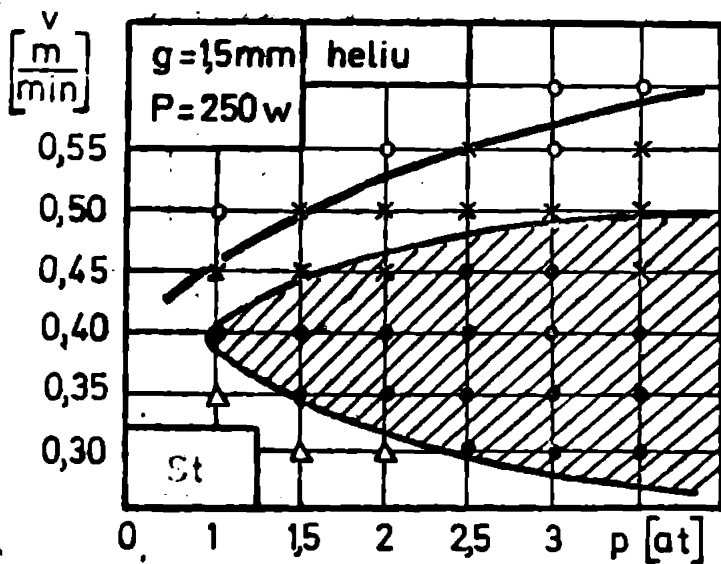


Fig. 6.22. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

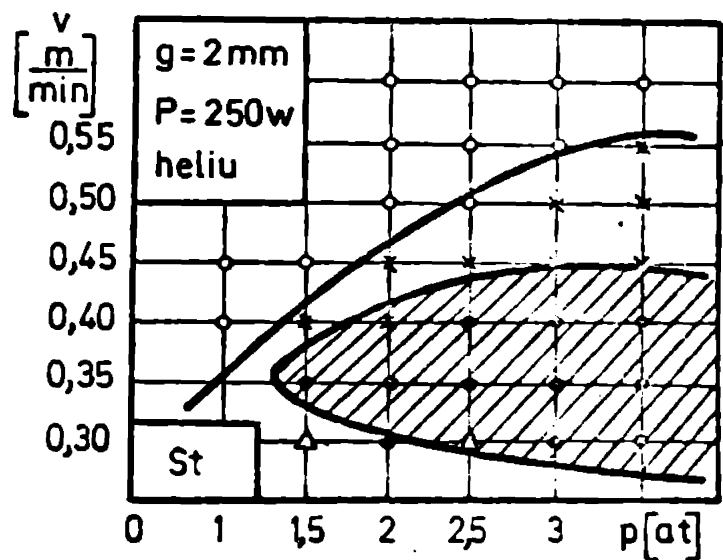


Fig. 6.23. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

La grosimile de 2 mm și presiuni mari ale gazului ajutător, tăierea devine rugoasă sau chiar intermitentă chiar la viteze mici de tăiere, aceasta, deoarece efectul de răcire al gazului sub presiune este atât de mare încît energia laserului este mult disipată

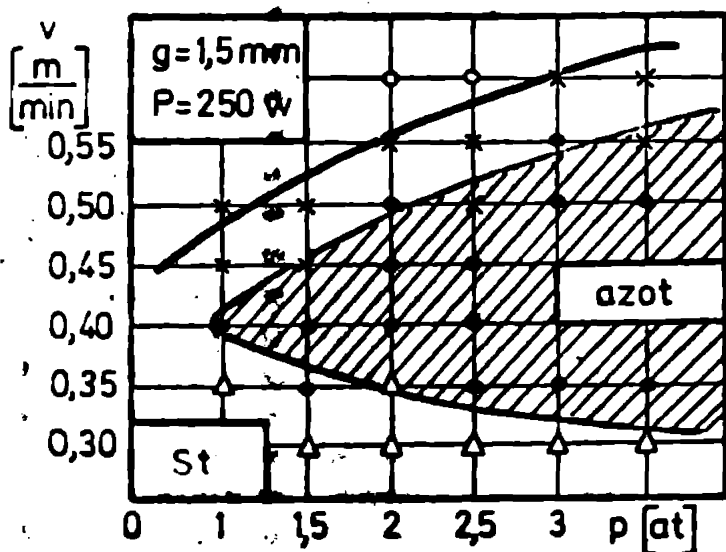


Fig. 6.24. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

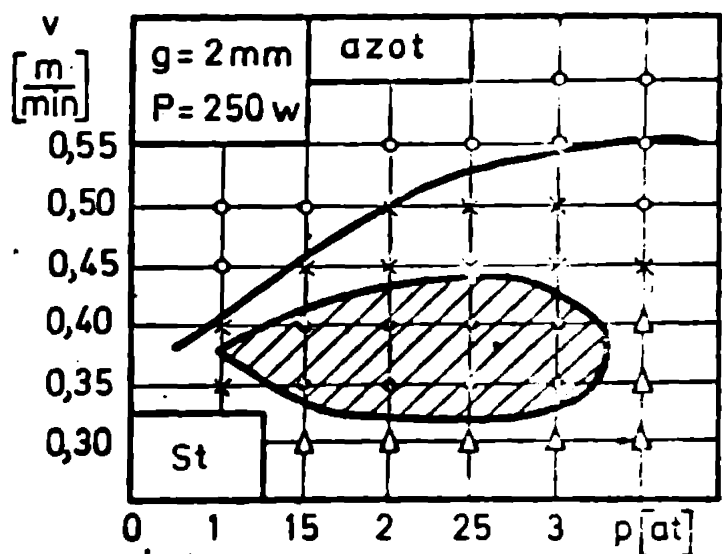


Fig. 6.25. Calitatea tăieturii pentru diferite viteze de tăiere

Dependențe similare se reparcă și în cazul utilizării în procesul de tăiere a azotului (fig.6.24; 6.25), sau aerului comprimat. Ca

și în cazurile precedente, se constată o creștere a vitezei de prelucrare odată cu creșterea presiunii gazului ajutător, creștere ce devine nesemnificativă la presiuni superioare valorii de 2,5 at.

Pentru grosimile de 3 și 4 mm tăierea cu laserul folosit la încercări devine foarte dificilă, chiar la viteza minimă a mesei (0,3 m/min), fiind necesare mai multe treceri pentru separarea materialului (5 și respectiv 8 treceri). Acest lucru relevă că energia laserului utilizat nu este suficientă pentru tăierea unor astfel de materiale. De remarcat că la locul de tăiere apare o pastă viscoasă de material care nu poate fi îndepărtată de jetul de gaz și care absoarbe o cantitate însemnată de energie.

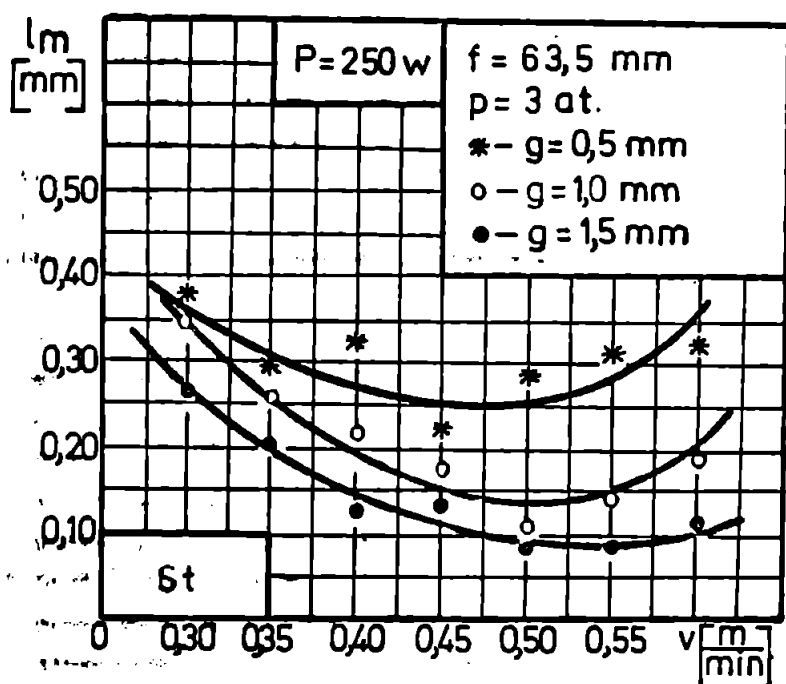


Fig. 6.26. Variația lățimii tăieturii în funcție de viteza de tăiere

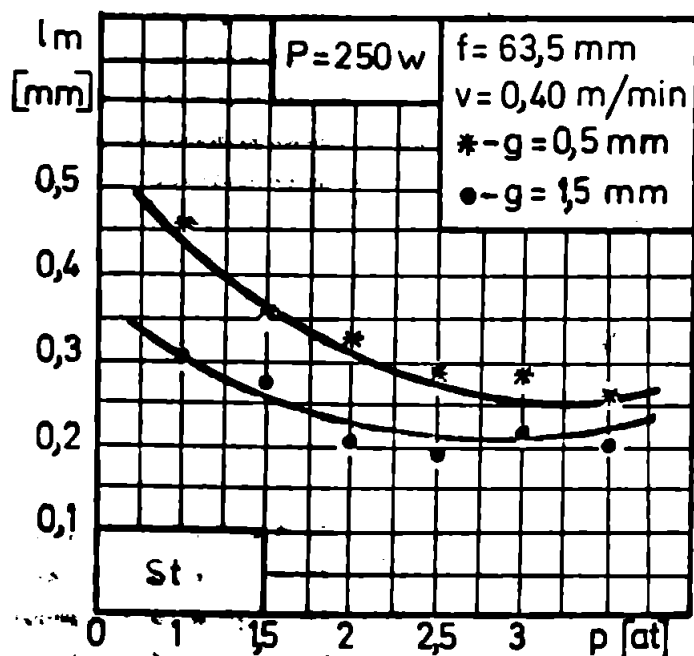


Fig. 6.27. Variația lățimii tăieturii cu presiunea gazului

Valorile măsurate pentru lățimea medie a tăieturii l_m au fost reprezentate grafic în fig. 6.26 și 6.27 în funcție de variația vitezei de tăiere și respectiv de presiunea gazului ajutător. Se observă că lățimea tăieturii scade odată cu creșterea vitezei de tăiere, pînă la o anumită valoare, după care crește din nou. Această creștere ne arată că sîntem în vecinătatea acelei valori de viteză pentru care tăierea materialului devine intermitentă.

Pentru grosimile considerate, viteza pentru care se obține o tăietură de lățime minimă se situează în limitele 0,4 - 0,5 m/min.

O variație similară a aceluiași parametru se constată la creșterea presiunii gazului ajutător.

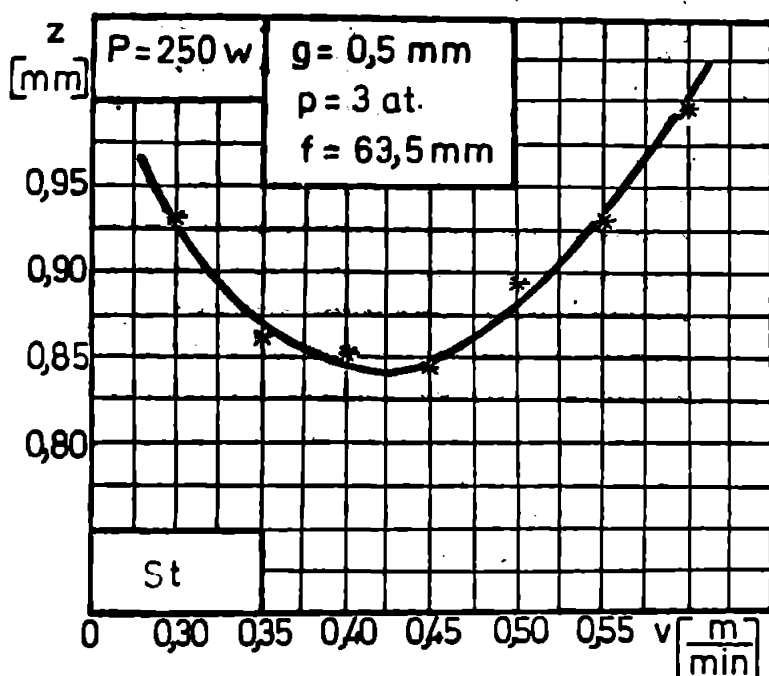


Fig. 6.28. Dependența lățimii zonei colorate de viteza de tăiere

Se atinge o valoare minimă a lățimii tăieturii la presiuni cuprinse în intervalul 2,5 - 3 at. Presiuni mai mari și deci debite mai mari de gaz nu se justifică și fi utilizate.

În fig.6.28 se reprezintă variația lățimii zonei colorate funcție de viteza de prelucrare. Valori minime ale acestui parametru se obține pentru aproximativ aceleași viteze ca și în cazul precedent ($v=0,4 \div 0,45$ m/min)

Din cele citava elemente prezentate se pot trage următoarele concluzii privind prelucrarea economică în condiții calitativ superioare a sticloteolitului, (în condițiile de experimentare descrise):

- grosimea materialului să nu depășească 2 mm;
- dușa de suflare a gazului să fie exploatată în condiții critice;
- presiunea gazului ajutător să fie cuprinsă între 2 și 3at;
- viteza de tăiere optimă $v=0,4 - 0,5$ m/min;
- să se asigure o ventilație corespunzătoare a locului prelucrării.

Se obțin în aceste condiții tăieturi având lățimea de 0,2 - 0,3 mm cu zone afectate termic ce nu depășesc 0,9 mm.

6.3.3. Unele aspecte privind fracturarea controlată a sticlelor industriale cu ajutorul laserului

Metoda fracturării controlate a produselor din sticlă industrială cu ajutorul laserului se impune tot mai mult ca una din metodele neconvenționale cu mari perspective.

La ora actuală există o serie de produse din sticlă a căror fracturare prin metodele convenționale (zgîriere cu diamant, retezare cu roți metalice, tăiere cu rezistența electrică, cu materiale abrazive, cu flacără, etc) conduce la un procentaj foarte mare de rebuturi (superior valorii de 20%).

Aceste probleme apar în mod deosebit la tăierea geamurilor ondulate și a profilelor din sticlă, la decolorarea produselor din sticlă pentru menaj etc.

Încercările efectuate privind decalotarea produselor din sticlă pentru menaj (pahare, vase, diverse vase etc), încercări efectuate la solicitarea Întreprinderii pentru produse din sticlă Tomești, au relevat productivitatea deosebită a procedurii de fracturare cu laserul, productivitate asociată unei calități a tăieturii net superioară celei obținute în momentul de față în respectiva întreprindere, unde decalotarea acestor produse se realizează cu flacără de aragaz.

Fracturările care au fost realizate (fig.6.29) prezintă o ruptură a cărei suprafață este cuprinsă într-un singur plan, curată, fără bavuri sau fisuri.

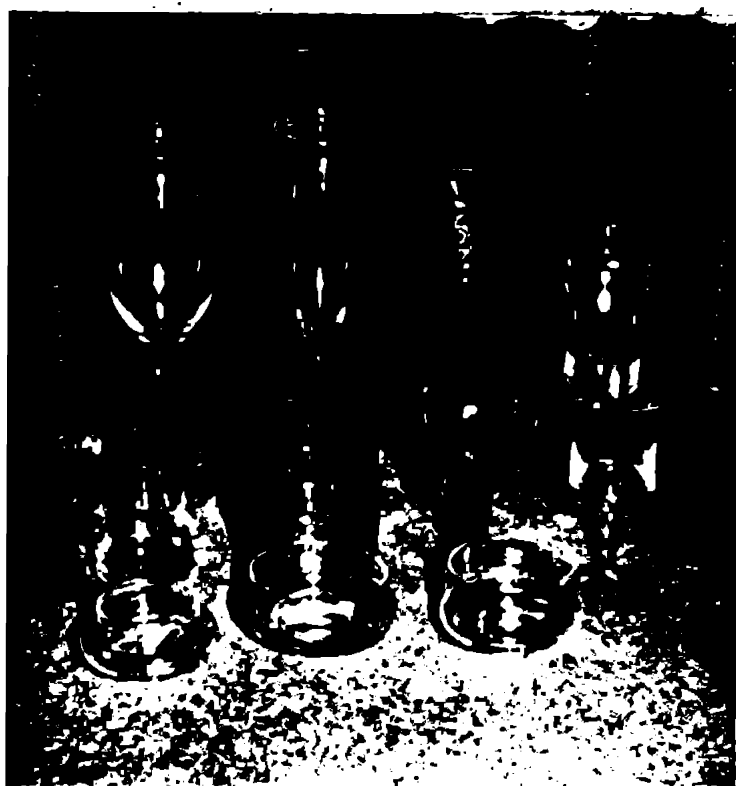


Fig.6.29. Unele produse fracturate cu ajutorul laserului

Această calitate, superioară celei obținute prin fracturarea cu arzătoare cu flacără de aragaz, reduce substanțial timpul necesar șlefuirii acestor suprafețe și implicit rebuturile ce apar prin spargere în timpul șlefuirii marginilor tăieturii.

Pentru determinarea condițiilor de realizare a unei fracturări controlate s-au realizat încercări de fracturare combinată: laser-mecanică asupra sticlelor plane industriale, ajungându-se pînă la limita de fracturare automată prin laser.

Pentru experimentări a fost utilizat laserul cu CO_2 de tip

FC 100 la un nivel de putere de 30 W. Focalizarea radiației laser s-a realizat cu ajutorul unei lentile din germaniu cu distanța focală de 50 mm.

Viteza de deplasare a probei în fața fasciculului focalizat a fost variată în limitele 6 - 30 mm/sec.

Pentru încercări au fost utilizate epruvete din sticlă industrială cu dimensiunile 30 x 150 mm de grosime: 2,1; 2,3; 3,7; 4,7; 5,3 și 5,7 mm.

Focalizarea fasciculului, s-a realizat la suprafața probei de grosime maximă (5,7 mm), pentru următoarele probe fasciculul s-a utilizat defocalizat, cu o defocalizare corespunzătoare reducerii grosimii probei, (suprafața de așezare a probelor nu s-a modificat în timpul experimentărilor).

În urma trecerii epruvetelor prin fața fasciculului laser focalizat s-a măsurat, cu ajutorul unui microscop de atelier, lățimea urmei lăsată de raza laser.

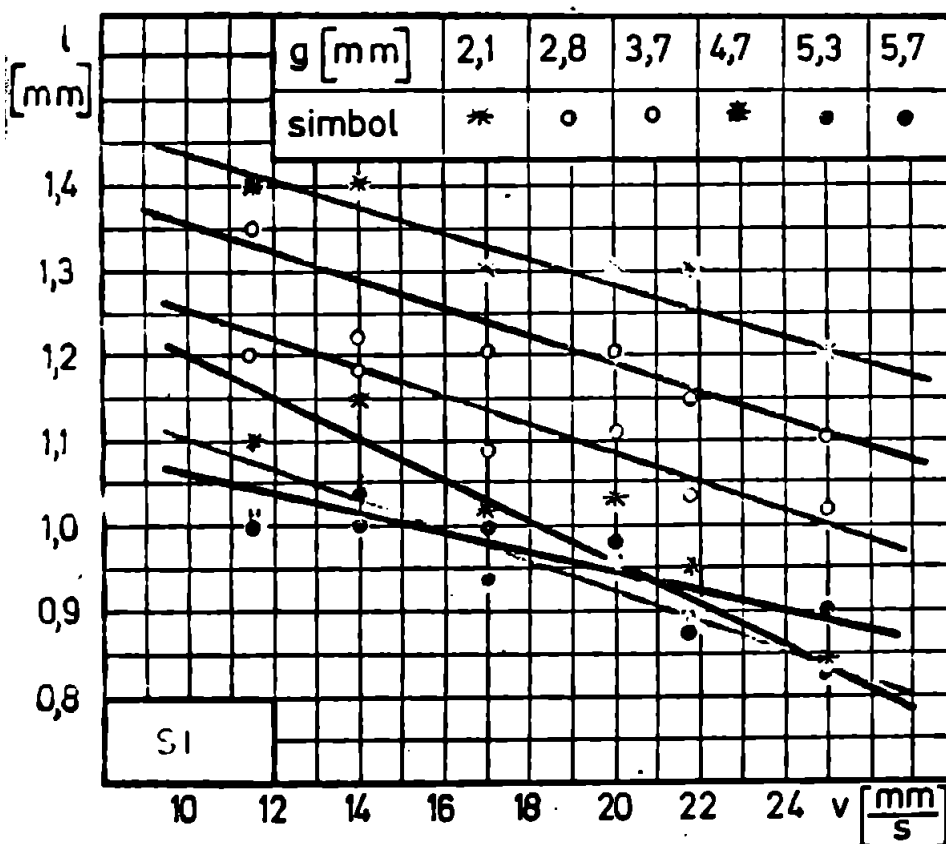


Fig. 6.30. Variația lățimii urmei laser funcție de viteză

Variația acestei lățimi este prezentată în fig. 6.30. pentru diverse grosimi de material, la viteze de deplasare și defocalizări diferite. Se constată o variație $l=f(v)$ de formă foarte apropiată de cea liniară.

Pentru trasarea grafică a dependențelor s-a utilizat ecuația de regresie

$$l = m_1 v + n_1 \quad (6.15)$$

obținându-se pentru coeficienții m_1 și n_1 valorile prezentate

în tab. 6.3. Se observă de asemenea că mărimile coeficientului de corelație liniară r_1 , definit cu relația:

$$r_1 = 1 \frac{\delta_y}{\delta_x} \quad (6.16)$$

în care:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6.17)$$

- x_1 - mărimea parametrului,
- \bar{x} - valoarea medie aritmetică a probei,
- n - numărul de puncte.

are o valoare foarte apropiată de 1, și deci corelația liniară stabilită este bună. Se remarcă o scădere a lățimii urmei odată cu creșterea vitezei, urma prezentînd aspectul unei cusături cu fisuri sub formă de cruce.

Variația lățimii urmei (Δl) ca urmare a variației defocalizării (Δh) prezintă de

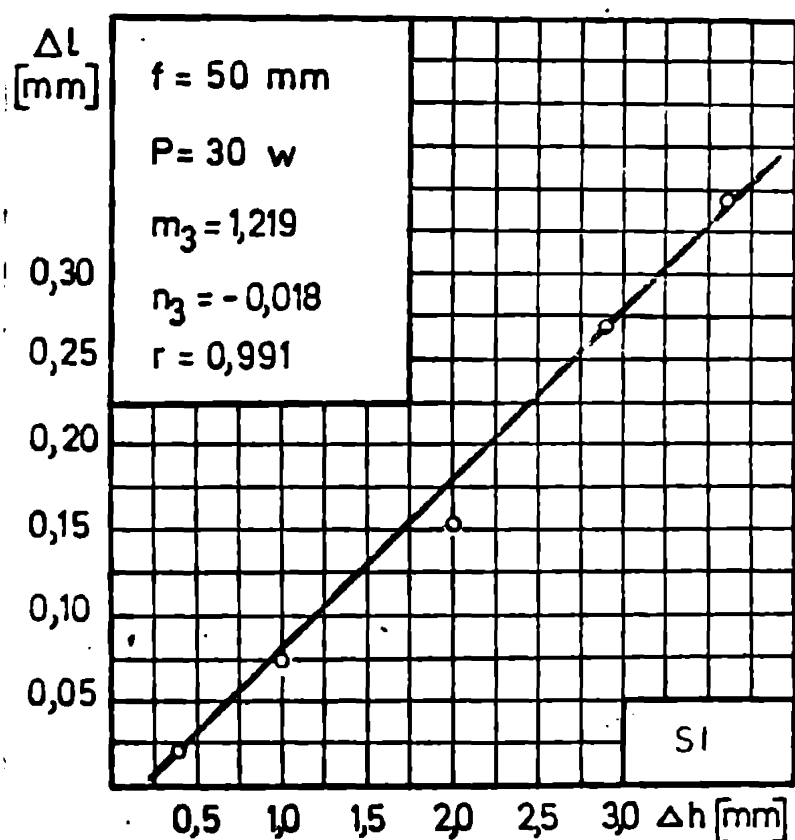


Fig. 6.31. Dependenta creșterii lățimii urmei funcție de mărimea defocalizării

asemenea o dependență liniară (fig.6.31) dată de ecuația de regresie;

$$\Delta l = m_2 \cdot \Delta h + n_2 \quad (6.18)$$

Valorile lui m_2, n_2 și r_2 sînt prezentate de asemenea în tab.6.3. În urma experimentărilor efectuate s-a constatat că la viteze sub 8 mm/sec se produce fracturarea automată a probei, fracturarea ce se explică prin creșterea tensiunilor termice ca urmare a creșterii densității de energie pe suprafața probei.

Epruvetele au fost apoi supuse unei încercări la

încovoiere în zona afectată de fascicul, încercări efectuate pe o mașină de încercat la tracțiune tip MT 58 de 2500 daN. Rezistența la rupere a sticlei, cunoscînd forța la care proba s-a fracturat, a fost determinată cu relația :

$$\sigma_r = 1,53 \frac{F \cdot L}{i \cdot g} \left[\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right] \quad (6.19)$$

în care;

F - forța (daN),

L - distanța între reazeme (mm),

i - lățimea probei (mm),

g - grosimea probei (mm).

În fig.6.32 se reprezintă variația grafică a rezistenței de rupere în zona afectată ca funcție de viteză de deplasare a

probei în fața fasciculului, pentru 3 grosimi de material. S-a utilizat o ecuație de regresie similară dependentelor anterioare:

$$\sigma_r = m_3 v + n_3$$

coeficientul de corelație liniară r_3 și coeficienții m_3 și n_3 fiind prezentate în tab.6.3.

Rezistența la rupere a sticlei utilizată în încercări a fost determinată la valoarea $\sigma_{r_0} = 6,1 \text{ daN/mm}^2$, cu mici variații

determinate de neomogenități ale materialului.

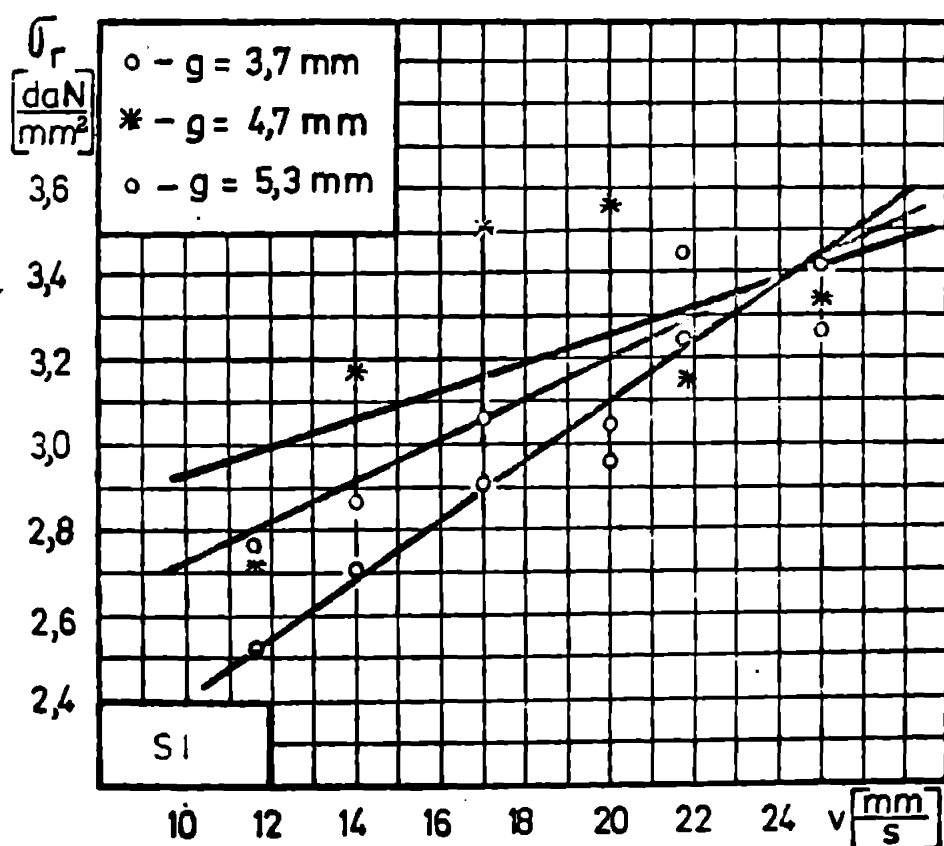


Fig. 6.32. Variația rezistenței la rupere funcție de viteză

Se observă din fig.6.32 o diferență evidentă între rezistența la rupere a probelor în zona afectată de fascicul laser și cea a materialului de bază (σ_{r_0}), diferențe ce ating valori relative într-un raport de 3 : 1.

Se poate deduce deci, că există posibilitatea de fracturare mecanică controlată, fractura pro-

ducându-se la o mică solicitare mecanică după direcția urmei lăsate de fasciculul laser.

În baza acestor experimentări orientative se poate aprecia că fasciculul laser poate fi utilizat cu succes și la fracturarea controlată a sticlei. Din încercările efectuate s-a constatat că lățimea urmei lăsate de fasciculul laser depinde de sistemul de focalizare, de diametrul petei focale și este de ordinul de mărime al adâncimii de distrugere (topire și vaporizare) a sticlei. Urma astfel realizată reduce considerabil rezistența sticlei în zona de acțiune a fasciculului laser. În acest fel se poate pune

problema fracturării sticlei prin acțiune mecanică.

Tinând seama ca pentru acțiunea laserului se folosește focalizarea la dimensiuni minime ale petei focale, diametrul acesteia fiind mai mic decât extinderea liniară a domeniului de încălzire, radiația laser poate fi considerată ca o sursă termică punctiformă și deci câmpul termic poate fi calculat cu relații cunoscute.

Nr. crt.	g [mm]	m ₁	n ₁	r ₁	m ₂	n ₂	r ₂
1	2,10	- 0,1399	1,5721	0,9354	-	-	-
2	2,80	- 0,1471	1,4685	0,8843	-	-	-
3	3,90	- 0,1473	1,3737	0,9319	0,666	1,7443	0,9897
4	4,70	- 0,2238	1,4299	0,8897	0,333	2,6349	0,5468
5	5,30	- 0,1702	1,2738	0,8904	0,441	2,3515	0,8533
6	5,70	- 0,0908	1,1257	0,8275	-	-	-
		m ₃ = 0,1219	n ₃ = - 0,0183	r ₃ = 0,9910			

Tab. 6.3. VALORILE COEFICIENTILOR PENTRU ECUATIILE DE REGRESIE SI A COEFICIENTULUI DE CORELATIE LINIARA.

Dacă în lungul suprafeței sticlei se deplasează fasciculul laser de putere suficientă, astfel ca să se obțină o încălzire la o temperatură superioară limitei de termostabilitate dar inferioară temperaturii de vitrifiere, atunci, la o anumită distanță, în urma fasciculului, apare o fisură care urmărește fasciculul, ceea ce face posibilă decuparea după contur.

Comparând rezultatele obținute prin experimentările efectuate cu rezultatele prezentate în literatura de specialitate se constată că acestea se încadrează în limitele delimitate și de alți autori. Aceste prime testări de fracturare a sticlei cu fasciculul laser cu CO₂ în emisie continuă arată că se poate obține o fracturare de bună calitate pentru sticlele plane precum și rezultate deosebit de favorabile privind decalotarea produselor din sticlă pentru menaj.

7. C O N C L U Z I I

Aplicarea la scară industrială a noilor tehnologii de prelucrare bazate pe utilizarea generatoarelor și amplificatoarelor cuantice (g.a.c.) de mare putere poate și trebuie să fie realizată în prezent prin soluționarea următoarelor deziderate :

- construirea în țară a unor instalații laser cu grad ridicat de fiabilitate, cu număr minim de servituți, ușor de exploatat și suficient de robuste pentru a "rezista" unei utilizări industriale;
- echiparea g.a.c. cu dispozitive de prelucrare specifice operațiilor pentru care sînt destinate aceste instalații, asigurînd în același timp sisteme de focalizare corespunzătoare;
- conceperea și aplicarea unor tehnologii de prelucrare cu o corelare corespunzătoare a parametrilor de lucru în vederea obținerii unei calități superioare a prelucrării la un consum energetic și de material minim;
- modelarea matematică și folosirea mijloacelor automate de calcul în vederea conducerii cît mai corecte a procesului de prelucrare și pentru reducerea duratei activității de proiectare tehnologică;
- menținerea unui contact permanent între producătorul de generatoare și amplificatoare cuantice, cercetător și producție în vederea depistării acelor locuri în care noua tehnologie poate înlocui cu rezultate superioare o veche tehnologie, realizînd prin aceasta o creștere a productivității și a calității produselor.

Cercetările efectuate în prezenta lucrare, în idea de a încerca rezolvarea unora din aceste deziderate, parte din acestea fiind solicitate de producție, s-au concretizat prin următoarele contribuții originale :

A. In domeniul cercetării fundamentale :

1. Fundamentarea din punct de vedere teoretic a fenomenului de interacțiune dintre radiația laser și materialul (metalic) supus prelucrării. Se tratează fazele interacțiunii ținându-se cont de transmiterea radială a căldurii, de îndepărtarea fazei lichide și a fazei gazoase. Se stabilesc relațiile pentru calculul vitezei de îndepărtare, a masei și randamentului îndepărtării precum și a cantității de energie necesară în fiecare caz.
2. Definirea principalilor parametri ai regimului de prelucrare cu laser precum și a influenței acestora asupra preciziei dimensionale și de formă geometrică, asupra productivității procedurii.
3. Modelarea matematică a procesului de prelucrare.
4. Stabilirea unei relații de calcul pentru determinarea vitezei de prelucrare a materialelor metalice în funcție de parametrii procesului de tăiere.

B. In domeniul cercetării aplicative.

1. S-au stabilit unele principii privind proiectarea dispozitivelor de prelucrare cu ajutorul laserului.
2. S-au stabilit condițiile necesare pentru alegerea corectă a lentilei de focalizare.
3. Sînt precizate criteriile de dimensionare și exploatare a duzelor pentru suflarea gazului ajutător în procesul de tăiere.
4. S-au proiectat și realizat o serie de dispozitive de acvire și focalizare a fasciculului laser precum și mese pentru fixarea și poziționarea obiectului de prelucrat ; toate fiind destinate echipării instalațiilor laser utilizate în experimentări.

5. Stabilirea influenței pe care o exercită un număr mare de factori asupra parametrilor de prelucrare dimensională cu ajutorul fasciculului laser focalizat.
6. S-a realizat o ordonare a parametrilor procesului de găurire în funcție de influența acestora asupra funcțiilor de răspuns considerate.
7. Prin aplicarea metodei de planificare statistică a experimentelor, la care valorile a trei variabile independente au fost variate simultan, iar efectele fiecăreia asupra funcțiilor de răspuns s-au determinat separat, au fost obținute modelele matematice ale criteriilor de performanță privind precizia prelucrării cu laser a oțelului 20 Cr 130.
8. Au fost stabilite 117 ecuații de regresie experimentale pentru estimarea principalilor criterii de precizie precum și a duratei de prelucrare la găurirea cu ajutorul laserului "Neodin 15" a oțelului 20 Cr 130.
9. Se pune în evidență influența pe care o exercită fasciculul laser focalizat asupra stratului marginal (structură și duritate sub microsarcină) la operația de găurire.
10. Se stabilesc domeniile de prelucrabilitate cu ajutorul laserilor utilizați în experimentări pentru unele materiale metalice și nemetalice.
11. Sînt precizate regimurile și condițiile în care se poate realiza prelucrarea cu laser a unor materiale lemnoase (furnire într-un singur strat și în pachot, plăcașe, plăci fibrolemoase, etc), a sticlotextoolitului precum și condițiile privind realizarea fracturării controlate a produselor din sticlă.

Prin prezenta lucrare, fără a avea pretenția unei cuprinderi exhaustive a problematicii abordate, se consideră

că s-au adus câteva contribuții la elucidarea unor aspecte teoretice și mai ales practice privind prelucrarea cu laser a materialelor, în dorința de a implementa în procesul de producție al bunurilor materiale laserii de construcție românească, de a oferi acestei noi tehnologii locul ce i se cuvine în rândul tehnologiilor de prelucrare neconvenționale.

BIBLIOGRAFIE

1. Achimescu N. - Studiul proceselor de generare a formelor spațiale la prelucrarea prin eroziune electrică - aspecte geometrice și substanțiale - Teză de doctorat Timișoara 1983
2. Achimescu N., Nichici A., - Aprecierea comportării la eroziune electrică a electrozilor din(Cu Si W-Cu) pe baza experiențelor planificate statistic - A III-a Sesiune de Comunicări Stiințifice "Creația tehnică și fiabilitatea în construcția de mașini" Iași 14-15 Nov.1980
3. Adams M.I. - Laser cutting, Engineering, Nr.5463, ian-febr. 1981 pg. 779-782
4. Adler P. Yu., Markova E.V., Granovsky Yu.V. - The desing of experiments to find optimal conditions - Moscow - 1975
5. Allmen M. - Prozesse beim Laserbohren in Metallen-Bern. 1975
6. Andrews I.G., Atthey D.R. - Hole formation in high power penetration welding - Marchwod Engineering Laboratories - iuly 1973
7. Anisimov S.I. - Deistvie izlucenia bolsoi mocinosti na metalli - Moskva 1972
8. Apostol D. ș.a. - Postcritical - density stationary plasma on highly absorbant (metallic) targets in vacuum under TEA-CO₂ laser radiation - Rev.Roum.Phys, Tome 21, Nr.4, p.371, 1976
9. Apostol D., Drăgănescu V. - Realizări în domeniul laserilor și aplicațiilor lor. - IFTAR București - 1981
10. Arzuov M.I. ș.a. - Influence of interference effects in oxide films on the kinetics of laser heating of metals - Sov. Jours Quant. Electron. 9(3) Mar.1979 pg.281-284
11. Arzuov M.I.ș.a. - Investigation of the absorption coefficient of metal targets irradiated by pulse-periodic CO₂ laser radiation in air. - Sov.I.Qvant.Electron 8(7) July 1978 pg. 892-897

12. Baiborodin V. - Spravocinik po lazernoi tehnikе - Kiev, Tehnika 1978
13. Baltă P. - Tehnologia sticlei - EDP București, 1966
14. Basov N.G. ș.a. - Laser Handbook - vol.2. Amsterdam, 1972
15. Behnisch H. - Schweissen und Schneiden mit energiereichen Strahlen - Die Maschine Nr.7-8 iul.1978
16. Bitzel H. - Wirtschaftliche Blechbearbeitung durch Stanzen und Laserschneiden - Werkstatt und Betrieb, RFG nr.9. 1979 pg.686-690
17. Bonch-Bruevich A.M. - Izmenenie otrajatelnoi sposobnosti metallov za vremea deistvia impulsa O.K.G. - Journ. Tekh. Fiz., Nr.5, 1968
18. Böhm I. - Pouziti a perspektivi lasera pri svarovani, rezani, vrtani a tepelnem spracovani kovu - Zvarenie R.S. Českoslovasca. 28, 1979 Nr.5 pg.157-159
19. Brandt G, De Kegel K, Van Hulle J., - Einige Ergebnisse von Schneid- und Schweissversuchen mit einem 900 W- CO₂-Laser - Schweissen und Schneiden RFG, 24, nr.7, m. 1971, pg.255-257
20. Brandt G., Spengelis B., Van Hulle J., - Schneiden mit einem CO₂-Laser, Schweissen und Schneiden RFG, 23, Nr.2, febr. 1971, pg.56-59
21. Ceaușescu D. - Utilizarea statisticii matematice în chimia analitică - Editura Tehnică - București, 1982
22. Ceaușescu Nicolae - Raport la cel de-al XIII-lea Congres al Partidului Communist Român. Editura Politică, 1983
23. Ceaușescu Nicu, Popescu Ion. - Tehnologii Neconvenționale - -Scrisul Românesc. Craiova, 1982
24. Chun M.K., Rose K., Interaction of high-intensity laser beams with metals.- Journ.Appl.Phys.vol.41,Nr.2,1970
25. Cohen M.I. - Laser Machining of thin films and integrated circuits - The Bell Sist.Tech.Journ., March, 1968
26. Constantinescu I., Columbovici D., Militaru G. - Prelucrare datelor experimentale cu calculatoare numerice - Aplicații din construcția de mașini.-Ed.tehnică, 1980

27. Crişan R ş.a. - Tehnologii de prelucrare pe instalația Laser "CO₂-400" - A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983, pg.543-551
28. Cucuruz C. - Program de calcul pentru evidențierea factorilor semnificativi în sistemele de acțiune tehnologică. - Sesiunea Stiințifică Jubiliară, Tg.Mureş, 1981
29. Cucuruz C. - Program Magiris/Förtran privind calculul Coef. de regresie simpli și pentru interacțiuni pentru un model matematic liniar. - A III-a Sesiune de Comunicări Științifice "Creația tehnică și fiabilitatea în construcția de mașini" Iași 14-15 Nov.1980
30. Dabby F.W., Paek V.Ch. - High intensity laser - induced vaporization and explosion of solid material - IEEE Journ. Quant. Electron., vol.QE8, Nr.2, 1972
31. Davies M.B., Laser drillind of diamond dies - B.O.C. Ind. Power Beams
32. David I., David I., - Unele rezultate experimentale privind prelucrarea cu laser a placajelor și a plăcilor fibroceramice emailate - A III-a Sesiune Anuală "Progrese în Fizică" Timișoara 22-24 oct. 1981
33. David I., David I., Nanu A - Asupra programului de experimente la găurirea cu laser a oțelurilor inoxidabile - A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale - pag.557, 3-5 Noembrie, 1983
34. David I., David I., Nanu A. - Rezultate experimentale la găurirea cu laser a tablei de oțel inoxidabil de 1 mm - A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale - pag.561, 3-5 Noembrie, 1983
35. David I., David I., Nichici A. - Particularități tehnologice ale fracturării sticlelor industriale cu ajutorul fasciculului laser - A III-a Sesiune Anuală "Progrese în Fizică", Timișoara, 22-24 oct. 1981
36. David I., Nanu A. - Precizia dimensională și de formă metrică la prelucrarea cu laser a oțelurilor inoxidabile - A III-a Sesiune anuală "Progrese în Fizică", Timișoara 22-24 oct. 1981

37. David I., Nanu A., Savii Gh. - Unele considerații cu privire la debitarea tablelor din oțel inoxidabil cu laserul CO_2 -CW - A III-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Sibiu, 14-15 mai 1982
38. David I., Savii Gh. - Dispozitive auxiliare la tăierea materialelor cu laser CO_2 - A III-a Sesiune anuală Progrese în Fizică, Timișoara, 22-24 oct.1981
39. Deutsch T.F.- Absorbtion coefficient of infrared laser window materials - Journ. Phys. Chem. Solids, Vol.34, pg.2092-2104, 1973
40. Deutsch T.F.. - Laser window materials - Jour. of Electronic Materials, vol 4, nr.4, 1975. pg.663-717
41. Drăgănescu V. ș.a. - Echipamente cu laser pentru prelucrări neconvenționale - Construcția de mașini 36 Nr.10, 1984 pg.554-562
42. Eleccion M. - Materials processing with lasers - I.E.E.E. Spectrum, April 1972
43. Engel S.L. - Metalworking With yag - Laser Focus. Dec.1970 pg.66-68
44. Gick A.E.F., Quigley M.B.C. - The importance of power density in penetration welding - Physics Electrical Research - october 1973
45. Glück A. - Metode matematice în industria chimică - Ed. Tehnic București, 1971
46. Grimm H., Amano K., Ruge J. - Einsatz eines Nd. YAG - Puls-lasers für Füge und Trennaufgaben - Metall. RPG, anul 31 Nr.8, aug.1977 pg.851-855
47. Hachfeld K. - Găurirea diamantelor cu laser - Anzeiger Industrie, R.F.G., 100 Nr.14, 17 II 1978
48. Herbrich H. - Wirtschaftlich Schneiden mit CO_2 - Lasern - Schweissen und Schneiden Nr.3 -1975 pg.94-97
49. Herbrich H., D.Weakott - CO_2 Laser... -Konstruktion Elemente Methoden Juli 1982, pg.21-23
50. Hohlov N.P.- Razrusenie metaliceskih foli izbucajiem CO_2 - Fizika i himija obrabotki materialov, URSS, Nr.6.1975, p.3-7

51. Illner D. - Gegenwart und Zukunft der Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlen - Berlin, 1981
52. Kochner E.ş.a. - Dynamics of laser processing in transparent media - I.E.E.E Journ.Quant.Electron., vol. QEB, Nr.2, p.120, 1972
53. Kovalenko V.S. - Obrabotka materialov impulsim izlucenim lazerov - Kiev - 1977
54. Krilov K.I., Prokopenko V.T., Nitrofanov A.S., - Primenenie lazerov v maşinostroenii i priborostroenii-Leningrad-1978.
55. Krause J.K. - Metalworking - Machine Desing, vol 50, 9 nov. 1978, pg.110-115
56. Lawrence J - Flowing abrasive improves laser - drilled hole qualiti - Laser Focus - April 1980
57. Locke E.V. - Il laser continua a CO₂ di grande potenza. - Rivista di meccanica n.710,Marzo (II) 1980 pg.39-43.
58. Lumly R.H. - Controlled separation of brittle materials using a laser - Jour. Amer.Cer.Soc.1969 Vol.52 Nr.9
59. Maciulka G.A. - Lazernaia obrabotka stekla - Moskva "Sovetskoe radio" 1979.
60. Maslowski - Fokussierung von Laserlich mit nichtidealen Linsen - Karlsruhe 1969 (Dissertation)
61. Metz S.A.ş.a. - Effect of beam intensity on target response to highintensity pulsed CO₂ laser radiation, Journ.Appl. Phys, vol.46,Nr.4, April 1975
62. Mihail R. - Introducere în strategia experimentării, cu aplicaţii din tehnologia chimică. - Editura Stiinţifică şi Enciclopedică - Bucureşti, 1976
63. Mihailov-Tepliakov V.A. - Paderjanie pastoičnstva y urovia rejusei golovki pri rezke listovih materialov gazovim lazerom - Mehanizacia i automatizacija proizvodstva, URSS, Nr.7.1978 p.11-15
64. Mori M., Kumehara H. - Study on ultrasonic laser machining.
65. Mori M., Kumehara H. - The Application of ultrasonic laser machining to laser deep - drilling technique - Bull.Japan Soc.of.Prec.Engg.,Vol.10,Nr.4 Dec.1976 p.177-179

66. Mori M., Kumehava H. - The effects of ultrasonic Vibration on the accuracy of laser machining - Bull. Japan Soc. of Prec. Engg. Vol 9, Nr.3, Sept.1975
67. Müller K. - Neue Möglichkeiten des Genaubreitenschneidens durch Anwendung des Feinstrahlprinzips. - Mitteilungen, Zentral Institut Schweisstechnik, R.D.G., 15, Nr.3 mar. 1973 p.269-275
68. Nalinov V.V. - Statisticheskie metody planirovaniya experimentov, Izd. Nauka, Moskva - 1965
69. Nanu A., David I., David I. - Aspects technologiques dans l'usinage de certains matériaux ligneux au laser - - Buletin St. și Tehnic IPT, Tom 29 (43) pag.49, 1964
70. Nanu A., David I., David I. - Influența caracteristicilor radiației asupra preciziei geometrice la găurirea cu laserul Neodim 15 a tablelor din oțeluri inoxidabile de 1,5 mm - A III-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Sibiu, 14-15 mai 1982
71. Nanu A., David I., David I. - Unele rezultate obținute la găurirea cu instalația laser românească Neodim-15 IPTAR a bușierelor din diamant natural și policristal de diamant sintetic - A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale pag.553, 3-5 noembrie 1983.
72. Nichici A.ș.a. - Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini - Ed. Pacla - 1983
73. Nichici A., Achimescu N., ș.a. - Probleme ale aplicării planificării statistice a experimentărilor în modelarea funcțiilor de răspuns ale sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică - A III-a Sesiune de Comunicări Științifice "Creația tehnică și fiabilitatea în construcția de mașini" Iași 14-15 nov.1980
74. Nichici A., Cucuruz C. - Evidențierea statistică a factorilor semnificativi la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașina ELER-01, Comunicările primei sesiuni tehnico-științifice Sătmărene - Satu Mare -5-7 X 1979
75. Nichici A., Cucuruz C., Modelarea empirică a funcției prelevare de material la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașina ELER-01-Comunicările primei sesiuni tehnico-științifice Sătmărene, Satu-Mare - 5-7 X 1979

76. Nichici A., Popovici V. - Geometria și precizia relativă a microalezajelor prelucrate cu fascicul laser la semifabricate din rubin. - Simpozionul de Mecanisme și Transmisii Mecanice - Timișoara 1980
77. Nichici A., Popovici V. - Implicații tehnologice ale fenomenologiei prelucrării cu fascicul laser a materialelor parțial transparente - Simpozionul de Mecanisme și Transmisii Mecanice - Timișoara 1980
78. Nowicki M. - Laser in Elektroniktechnologie und Materialbearbeitung- Leipzig - 1982
79. O'Shea D., Russell W., Rhodes W. - Introduction to Lasers and their applications - Moskva - 1980
80. Paek V.Ch., Gagliano F.P. - Thermal analysis of laser drilling processes-IEEE Journ.Quant.Electron., vol QE8 Nr.2, 1972
81. Pahlitzsch G. - Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlen - herstellen von Löchern -Strahltechnik Nr.26, 1983 pg.79-88
82. Paradine C.G., Rivett B.H.P., Statistical Methods for Technologists - London - 1970
83. Peschko W. - Abtragung fester Targets durch Laserstrahlung - Darmstadt 1981 (Dissertation)
84. Peters C.C., Banas C.M.- Cutting wood and wood-base products with a multikilowatt CO_2 Laser-Forest Products Journal, vol.27 Nr.11, 1977 pg.41-45
85. Popescu M.I.ș.a. - Aplicații ale laserilor -Ed.Tehnică 1979
86. Prochorov A.M.ș.a.- Metal evaporation under powerful optical radiation - IEEE Journ.Quant.Electron, vol. QE9 Nr.5, 1973
87. Raizer P. - Deistvie lazernovo izlucenia - (Colecția de articole), Moskva - 1978
88. Rancu N., Tôvissi L. - Statistică matematică cu aplicație în producție Ed.Academiei 1963
89. Ready J.F. - Change of reflectivity of metallic surfaces during irradiation by CO_2 -TEA laser pulses - I.E.E.E. Journ. Quant.Electron., vol QEL2, Nr.2, 1976.
90. Ready J.F. - Effects due to absorption of laser radiation- Journ.Appl.Phys., vol.36, p.462, 1965

91. Reinhard P. - Materialbearbeitung mit einem Nd-YAG-Grundmodellaser.-Darmstadt - 1980
92. Remund R. - Der Laserstrahl als Bearbeitungsmittel - Technica Nr.26,1972 pg.2406-2409
93. Rykalin N., Uglov A., Kokora A. - Laser machining and welding - Moscow, 1978
94. Savii Gheorghe. - Laseri - Aplicații în ingineria tehnologică
95. Savii Gh., David I. - Unele rezultate experimentale privind tăierea cu laser cu bioxid de carbon a steclotextolitului - A. II-a Conferință "Tehnologii Noi în Construcția de Mașini", pag.101, Galați, dec.1977.
96. Savii Gh., David I., Bagiu L. - Unele considerații privind influența fascicolului laser focalizat asupra stratului marginal la tăierea tablelor din oțel inoxidabil - - A III-a Sesiune Anuală "Progrese în Fizică", Timișoara 22-24 oct.1981
97. Schachrai A., Castellani Longo M. - Application of high power lasers in manufacturing - Annals of the C.I.R.P.vol.28/2/1979
98. Schapp I.D.ș.a.- Untersuchung zur Laserstrahlwirkung bei der Bearbeitung silikatischer Werkstoffe - Schweisstechnik R.D.G. Nr.7,1979,pg.296-300
99. Schäfer H.P. - CO₂-Laser-Experimente zum laserinduzierten Gasdurchbruch - Darmstadt - 1980
100. Schokulin K., Industrielle Praxis des Laserstrahl - Schneidens - Werkstatt und Betrieb Nr.114.Sept.1981
101. Spalding I.J. - High power laserstheir industrial and fusion applications - Optics and laser technology, August,1980
102. Spalding I.J. - High power lasers for processing of materials a comparison of available systems - Culham Laboratory, U K Received 7 July 1977
103. Stanabrau I.B. CO₂ - Gaslaser der Materialbearbeitung - Laser + Electro-Optik Nr.3/1977 p.337-340
104. Steffen J.-Präzisionsbohrung mit Laser - Strahlen - Feinwerktechnik und Messtechnik (R.F.G) Nr.3, 1975 pg.93-98
105. Stelmaha M.O. - Lazeriv tehnologii - Moskva 1975.

106. Tihomirov A.U.ș.a. - Rejimî gazolasernei rezki tonçolistovîh materialov - Svarocnoe proizvodstve Nr.5, 1975 pg.13-15
107. Tiron M. - Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare - Ed.Tehnică - București, 1977
108. Tradowky K. - Laser kurz und bündig - Vogel-Verlag Würzburg 1978
109. Trușculescu M., Ieremia A. - Oțeluri inoxidabile și refractare. Ed.Facla 1983.
110. Veret C. - Les lasers; emploi et servitudes - Revue Francaise de Mécanique Nr.69, 1979 pg. 13-22
111. Visser A. - Laserstrahlung als Werkzeug für die Fertigung - VDI -z 117 Nr.11 - Iuni. 1975
112. Wagner R.E. - Laser drilling mechanics - Journ. Appl. Phys., Vol.45,Nr.10, oct.1974.
113. Western Electric - Laser. - A valuable tool in ceramics - Ceramic Industry vol.108,Nr.5,1977 pg.34-46
114. Wissenbach K. - Materialbearbeitung mit einem Hochleistungs - CO₂- Laser - Darmstadt - 1980
115. Woodyard D. - Experiments with laser machining - Engineering Nr. 5443, 4 sept.1970.
116. x x x - Directivele Congresului al XIII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul 1986-1990 și orientările de perspectivă pînă în anul 2000.
117. x x x - Programul Directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului Tehnic în perioada 1981-1990 și direcțiile principale pînă în anul 2000
118. x x x - Toleranțe și ajustaje - Standarde și comentarii Ed. tehnică 1969.