

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

ING. SIMONA GAVRI LĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

POSSIBILITĂȚI DE OPTIMIZARE A PRELUCRĂRII CU
LASER A UNOR MATERIALE OPTICE PARȚIAL
TRANSPARENTE

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

PROF. DR. ING. VASILE POPOVICI

TIMIȘOARA

2008

CUPRINS

1. INTRODUCERE	1
2. STADIUL ACTUAL PRIVIND APLICAȚIILE LASERILOR LA PRELUCRAREA MATERIALELOR OPTICE PARȚIAL TRANSPARENTE	5
2.1. Aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor normale	5
2.2. Aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor optice	11
2.3. Aplicațiile laserilor la prelucrarea materialelor polimerice parțial transparente	13
3. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	17
4. MATERIALE UTILIZATE. STICLE OPTICE SI POLIMERI OPTICI.	18
4.1. Sticlele optice	18
4.1.1. Introducere	18
4.1.2. Materia primă folosită la obținerea sticlelor optice	19
4.1.3. Clasificarea sticlelor optice	19
4.1.4. Proprietățile sticlelor optice	21
4.1.4.1. Proprietățile optice ale sticlei	21
4.1.4.2. Proprietățile chimice ale sticlei	27
4.1.4.3. Proprietățile termice ale sticlei	27
4.1.4.4. Proprietățile mecanice ale sticlei	29
4.1.5. Domenii de utilizare	33
4.2. Polimeri optici	33
4.2.1. Policarbonatul	38
4.2.1.1. Proprietăți fizice	39
4.2.1.2. Proprietăți mecanice	39
4.2.1.3. Proprietăți chimice	40

4.2.1.4. Proprietăți termice și electrice	41
4.2.1.5. Proprietăți optice	41
4.2.1.6. Domenii de utilizare	41
4.2.2. Polimetil metacrilat	42
4.2.1.1. Proprietăți fizice și optice	43
4.2.1.2. Proprietăți mecanice	43
4.2.1.3. Proprietăți chimice	44
4.2.1.4. Proprietăți termice și electrice	44
4.2.1.5. Domenii de utilizare	45
4.3. Concluzii	45
5. EFECTE INDUSE DE IMPACTUL CU RADIATIILE LASER IN CORPURI PARȚIAL TRANSPARENTE	46
5.1. Introducere	46
5.2. Studiul interacțiunii radiației laser – sticlă optică/polimeri optici	47
5.3. Stabilirea condițiilor optime la prelucrarea cu laser a unor sorturi de sticle optice/polimeri optici	52
5.4. Stabilirea condițiilor de cuplare a radiației	55
5.5. Efecte de interes tehnologic induse de radiația laser în corpuri parțial transparente	58
5.6. Influențe ale impactului radiației laser – sticlă optică/ polimeri optici în zona de prelucrare (ZIT)	62
5.7. Concluzii	63
6. MODELAREA PRELUCRĂRII CU LASER A MATERIALELOR OPTICE PARȚIAL TRANSPARENTE	64
6.1. Noțiuni introductive	64
6.2. Strategii de experimentare	66
6.3. Metode de analiză statistică în cercetarea experimentală	71

6.4. Contribuții privind determinarea unui model sistemic generalizat pentru procesul tehnologic de prelucrare cu radiație laser a materialelor optice	74
7. CERCETARI EXPERIMENTALE	80
7.1. Obiectivele și condițiile experimentale la prelucrarea prin găurire cu radiație laser a sticlelor optice	80
7.1.1. Condițiile cercetării experimentale	80
7.1.1.1. Materiale	81
7.1.1.2. Instalații laser utilizate	82
7.1.1.3. Aparare de măsură și control	92
7.1.2. Obiectivele cercetării experimentale	93
7.1.2.1. Stabilirea factorilor de influență (FI) și a funcțiilor obiectiv (FO) la prelucrarea prin găurire cu laser a sorturilor de sticlă optică	93
7.1.2.2. Alte obiective urmărite	95
7.2. Obiectivele și condițiile experimentale la prelucrarea prin marcarea cu radiație laser a polimerilor optici	97
7.2.1. Condițiile cercetării experimentale	97
7.2.1.1. Materiale	98
7.2.1.2. Instalația laser pentru marcarea (Franța)	102
7.2.1.3. Aparat de măsură și control	104
7.2.2. Obiectivele cercetării experimentale	104
7.2.2.1. Stabilirea factorilor de influență (FI) și a funcțiilor obiectiv (FO) la prelucrarea prin marcarea cu laser a polimerilor optici	104
7.2.2.2. Alte obiective urmărite	106
7.3. Rezultatele cercetărilor experimentale	107
7.3.1. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser	

de prelucrare Nd-Sticlă din Timișoara	107
7.3.2. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu CO ₂ GT-1200 de la IFTAR București	115
7.3.2.1. Cercetările experimentale în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser a celor trei sorturi de sticlă optică, efectuate pe instalația laser cu CO ₂ GT-1200 de la IFTAR București	122
7.3.2.2. Analiza efectelor induse de radiația laser în sorturile de sticlă optică în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser efectuată pe instalația laser cu CO ₂ GT-1200 de la IFTAR București	155
7.3.3. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu CO ₂ TER din Franța	160
7.3.3.1. Analiza efectelor induse de radiația laser în sortul de sticlă optică BK7 în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser efectuată pe instalația laser cu CO ₂ TER din Franța	174
7.3.4. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu Nd-YAG din Franța	178
7.3.4.1. Cercetările experimentale pentru PMMA	178
7.3.4.2. Cercetările experimentale pentru PC	183
8. ANALIZA SPECTROFOTOMETRICĂ A SORTURILOR DE STICLĂ OPTICĂ PRELUCRATE	198
9. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	208
BIBLIOGRAFIE	212
DICȚIONAR DE ACRONIME ȘI NOTAȚII	220

1. INTRODUCERE

Dezvoltarea rapidă a laserilor a fost însoțită de aplicarea lor în numeroase domenii științifice și tehnologice. Prelucrarea materialelor cu laser se numără printre domeniile tehnicii care au cunoscut o dezvoltare impetuoasă, astfel încât, în ultimul timp aceste tehnologii s-au deplasat din laboratoare și centre de cercetare spre marea industrie. Folosirea laserilor în prelucrări de materiale se justifică numai atunci când tehnicile clasice nu dau satisfacție în ceea ce privește productivitatea sau calitatea operației [26].

Utilizarea fasciculelor laser ca agenți erozivi este o consecință nemijlocită a proprietăților excepționale ale radiației laser, fiind determinată de posibilitatea concentrării fasciculelor pe suprafețe foarte mici, precis definite geometric și dimensional. Prin aceasta devin realizabile intensități locale ale radiației superioare valorilor de prag necesare declanșării și întreținerii unor procese de eroziune ale materialului supus iradierii.

Caracterul și dinamica efectelor induse de radiația laser în obiectul de prelucrat depind, pe de-o parte, de proprietățile optice, termice și mecanice ale materialului acestuia și, pe de altă parte, de intensitatea I_L [W/cm^2] sau de densitatea de energie E [J/cm^2], lungimea de undă λ [μm], structura modală TEM_{mm} a radiației și regimul de funcționare al oscilatorului laser.

Absorbția radiației laser de către solide este funcție de lungimea de undă a radiației (preferabil $\lambda < 4 \mu m$ la prelucrarea materialelor metalice și $\lambda > 4 \mu m$ la prelucrarea materialelor nemetalice parțial transparente) și de natura, temperatura, rugozitatea și gradul de impurificare al suprafeței absorbante [6], [54].

Pentru materialele opace (în particular, metale) sursa termică dezvoltată în contul energiei radiației are un caracter superficial (regiunile limitrofe suprafeței vor fi încălzite exclusiv prin conducție termică) iar pentru materialele parțial transparente numai o mică fracțiune a radiației incidente este reținută de către suprafață, sursa termică determinată de absorbția energiei radiației dobândind un pronunțat caracter volumic. Creșterea temperaturii suprafeței iradiată, inclusiv cu dezvoltarea unor transformări ale stării de agregare, duce la diminuarea reflectivității iar prezența peliculelor oxidice pe suprafețe metalice și a peliculelor metalice pe substraturi ceramice determină creșterea respectiv

diminuarea energiei absorbite, în condiții date. Rugozitatea suprafeței iradiate și în particular corelația indicatorilor de rugozitate cu lungimea de undă a radiației laser influențează, de asemenea, ponderea energiilor reflectată și respectiv absorbită de suprafața obiectului prelucrat.

Procesele de absorbție a energiei radiației laser în materialele parțial transparente și efectele de interes tehnologic induse în acestea prezintă unele particularități față de materialele metalice:

- caracterul predominant volumic al absorbției energiei fasciculului laser;
- necesitatea realizării pe suprafața de prelucrat a unor valori de prag ale intensității radiației superioare celor capabile să declanșeze efecte tehnologice similare în materialele metalice (aceste valori sunt extrem de sensibile la prezența impurităților și defectelor structurale, puternic absorbante, în stratul de suprafață al materialului prelucrat);
- dezvoltarea, în paralel cu fenomenele de natură termică, determinate pentru procesul de eroziune a materialului, a unor fenomene optice sau electrice [54].

Absorbția extrem de localizată a energiei radiației laser de către materialele cu tendință de rupere fragilă (materiale ceramice, sticlă, semiconductori) poate determina dezvoltarea în interiorul acestora a unor gradienti termici ridicați și respectiv a unor tensiuni interne reziduale de ordinul rezistenței de rupere și chiar a unor amorse de rupere rezultând posibilitatea debitării ușoare a acestora [54]. Pentru un obiect de prelucrat dat ca natură, geometrie și dimensiuni, forma și dimensiunile alezajelor executate depind semnificativ de energia, durata și alura impulsului laser, de dimensiunile petei focale și distribuția intensității radiației (densității de energie) în aceasta, de poziția suprafeței de prelucrat în raport cu planul focal (la prelucrarea în regim monopuls), cărora li se adaugă numărul și frecvența impulsului. Forma și dimensiunile alezajelor prelucrate sunt extrem de sensibile la poziția planului focal al fasciculului în raport cu suprafața de prelucrat (defocalizarea suprafeței de prelucrat) [3], [5], [8].

Pornind de la ipotezele de mai sus, în această teză se prezintă un studiu amplu al prelucrabilității cu radiație laser a unor sorturi de sticlă optică, respectiv polimeri optici parțial transparenti. Pentru realizarea experimentelor s-au utilizat 4 instalații laser: o instalație laser în impulsuri cu mediu solid Nd-sticlă din Timișoara, două cu mediu gazos

CO₂ (intalația GT-1200 de la IFTAR București și instalația laser TER cu lungimi de undă variabile - 9,3 ÷ 11,5 μm din Franța) iar pentru polimeri o instalație laser de marcarea cu mediu solid Nd-YAG (Franța). Materialele optice au fost prelucrate atât neacoperite (polimeri, sticle) unele prezentând rugozități diferite și/sau fiind acoperite cu diferite straturi subțiri absorbante sau reflectante (doar pentru sticle), pentru modificarea parametrilor optici astfel încât să se depășească valoarea de prag a intensității necesară pentru declanșarea efectelor erozive în materialul studiat [5]. Totodată s-a luat în calcul și posibilitatea de a prelucra materiale polimerice parțial transparente care înlocuiesc cu succes sticlele optice în industria optică. Acestea din urmă fiind ușor casabile, există riscul ca în urma prelucrărilor convenționale sau neconvenționale să se distrugă în parte sau în totalitate, motiv pentru care datorită pierderilor mari de material, polimerii parțial transparentii tind să ocupe un loc important în industria optică.

În contextul celor prezentate mai sus, prin studiul literaturii de specialitate și pe baza experienței tehnologice acumulate nemijlocit în prelucrarea cu radiație laser a materialelor optice parțial transparente analizate, această lucrare a fost structurată în 9 capitole care cuprind un total de 222 pagini, 54 tabele, 158 figuri și 88 titluri bibliografice dintre care 8 lucrări proprii.

Capitolul 2 prezintă stadiul actual în lume al aplicațiilor laser la prelucrarea materialelor optice parțial transparente (sticla obișnuită, sticla optică și polimeri parțial transparentii).

În capitolul 3 sunt conturate obiectivele acestei teze de doctorat, urmărindu-se ca obiectiv final prioritar optimizarea după criterii de productivitate și/sau calitate a tehnologiei de prelucrare cu radiație laser a materialelor optice parțial transparente.

Următoarele trei capitole reprezintă partea teoretică a acestei lucrări după cum urmează: capitolul 4 analizează proprietățile materialelor optice utilizate pentru prelucrarea cu radiație laser, capitolul 5 prezintă efectele induse de impactul radiației laser în materialele parțial transparente iar capitolul 6 realizează modelarea prelucrării cu radiație laser a acestor materiale.

Cel mai vast capitol este capitolul 7 în care se dezvoltă partea experimentală a prelucrărilor cu radiație laser a sorturilor de sticlă optică alese pentru studiu dar și a

polimerilor optici parțial transparenți (PMMA și PC) cu scopul optimizării acestor tehnologii.

Un capitol de o noutate absolută este capitolul 8 în care pentru prima dată într-o astfel de teză de doctorat face o analiză spectrofotometrică a sorturilor de sticlă optică prelucrate pentru obținerea spectrelor de emisie sau absorbție în zonele prelucrate.

Lucrarea se încheie cu un capitol în care sunt formulate concluziile finale și sunt prezentate principalele contribuții personale.

Acestă teză reprezintă o modestă contribuție adusă prelucrărilor cu radiație laser a materialelor optice parțial transparente (sticle optice – rezistente la radiații: BK7, SF5, TF101, respectiv polimeri optici – PMMA și PC) și care deschide noi orizonturi către optimizarea unor astfel de procese și aplicarea lor directă în industrie.

Folosesc acest prilej pentru a aduce mulțumiri conducătorului științific **prof. dr. ing. Vasile Popovici** pentru acceptarea mea la pregătirea tezei de doctorat și pentru competența și răbdarea cu care m-a sprijinit și îndrumat în activitatea desfășurată. Mulțumiri pentru înțelegerea și ajutorul acordat în elaborarea și finalizarea acestei lucrări sunt aduse, de asemenea, colectivului Catedrei de Tehnologie Mecanică, tuturor acelorora care mi-au fost alături și nu în ultimul rând, familiei.

2. STADIUL ACTUAL PRIVIND APLICAȚIILE LASERILOR LA PRELUCRAREA MATERIALELOR OPTICE PARȚIAL TRANSPARENTE

2.1. Aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor normale

Laserii, creați acum două decenii ca o confirmare strălucită a unor previziuni teoretice făcute de Einstein cu mai bine de o jumătate de secol în urmă, au cunoscut o dezvoltare spectaculoasă, cu implicații majore în numeroase domenii ale științei și tehnicii, ale activității economico-sociale în general, incluzând fizica, chimia, energetica, comunicațiile, metalurgia, prelucrarea materialelor, medicina, arta și altele.

Țara noastră s-a înscris în primele rânduri ale cercetării laserilor și aplicării tehnologiilor noi introduse de laseri. Încă din 1962, un colectiv al Institutului de fizică atomică, condus de Ion Agârbiceanu, a realizat un laser cu heliu-neon. Astfel, numeroase centre de cercetare, învățământ, producție, ocrotire a sănătății, beneficiază în prezent de aportul acestor noi instrumente și al tehnologiilor asociate [26].

Se poate observa în acest sens că de-a lungul anilor s-au prelucrat cu ajutorul radiației laser o largă gamă de materiale (metale, nemetale, lemn, plastic și chiar sticlă), accentul punându-se în special pe prelucrarea metalelor. Totuși există domenii mai puțin studiate cum ar fi cel al prelucrării sticlelor în general și al sticlelor optice în special, motiv pentru care se dorește cunoașterea cât mai exactă a efectelor interacțiunii radiației laser cu aceste materiale. Astfel, deși aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor optice este un domeniu mai puțin abordat în literatura de specialitate, există câteva experimente cu privire la comportarea acestora cât și a sticlelor simple la interacțiunea cu radiația laser [34], [44], [45], [47], [48], [59], [65].

În urma unui studiu efectuat la solicitarea *Întreprinderii pentru produse din sticlă Tomești*, asupra unor produse din sticlă de menaj (pahare, vase, diverse vase etc), s-a constatat că față de prelucrarea cu flacăra de aragaz aplicată la decalotarea produselor mai sus amintite, prelucrarea cu laser în vederea fracturării controlate a sticlei permite obținerea unei productivități ridicate asociată unei calități a tăieturii net superioară celei obținute prin metode convenționale (zgâriere cu diamant, retezarea cu

roți metalice, tăiere cu rezistență electrică, cu materiale abrazive, cu flacără etc). Prin metodele convenționale procentul de rebuturi este foarte mare, depășind 20% [24].

Pentru experimentări a fost utilizat laserul cu CO₂ de tip FC 100 la un nivel de putere de 30 W, radiația laser fiind focalizată cu ajutorul unei lentile de germaniu cu distanța focală de 50 mm. Viteza de deplasare a probei în fața fasciculului focalizat a fost variată în limitele 6-30 mm/s. Pentru încercări au fost utilizate epruvete din sticlă industrială cu dimensiunile 30 x 150 mm, de grosime: 2,1; 2,8; 3,7; 4,7; 5,3 și 5,7 mm [24].

În continuare se vor dezvolta pe baza datelor din literatură cât și a experienței autorului în domeniu, aspectele legate de posibilitatea de prelucrare a unor sorturi de sticlă.

Astfel, trebuie precizat că la prelucrarea sticlei cu ajutorul fasciculului laser au loc o seamă de fenomene cum ar fi: topirea, vaporizarea, sublimarea și chiar descompunerea unor componente care intră în materialul de prelucrat. Din aceste motive, în literatură sunt prezentate două metode distincte de prelucrare și anume: prelucrarea dimensională prin suflarea topiturii din zona de lucru cu ajutorul unui jet de aer și prelucrarea prin vaporizare propriu-zisă. Cele două metode de prelucrare dimensională a sticlei au fost îndelung studiate în [49] și în final s-au putut trage câteva concluzii care să permită prelucrarea și a altor sorturi de sticlă, necercetate până în prezent.

S-a observat astfel că se pot prelucra sticlele atât în stare rece cât și după ce au fost preîncălzite inițial la o temperatură cuprinsă între 500-700°C (aproximativ 600°C) pentru reducerea tensiunilor interne din masa sticlei care ar putea favoriza apariția fisurilor. Trebuie precizat că o temperatură mai apropiată de 500°C duce la distrugerea sticlei în procesul de prelucrare, iar încălzirea până la 700°C duce la o deformare puternică a acesteia. De aceea, drept temperatură optimă pentru acest proces, se consideră o valoare cât mai apropiată de 600°C, care este temperatura de recoacere pentru sticle [49].

Prelucrarea sticlei cu ajutorul radiațiilor laser, concomitent cu topirea muchiilor sticlei, exclude necesitatea prelucrării ulterioare a acesteia prin șlefuire pentru asigurarea preciziei necesare a piesei și îndepărtarea bavurii. În acest fel se conturează cel mai bine avantajele prelucrării cu laser cât și eficiența ei comparativ cu

metodele tradiționale. Această metodă a arătat că este posibilă prelucrarea ușoară a unor piese de orice formă din sticlă, fapt ilustrat de altfel și în figura 2.1.

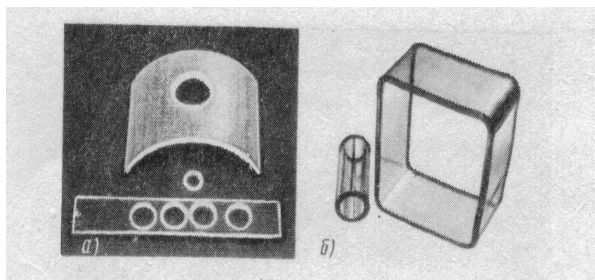


Figura 2.1. Prelucrarea sticlei de cuarț cu radiație laser

a) piesă tip folie, b) piesă cu contur închis

Aceste prelucrări s-au realizat pentru piese de 4,5 mm grosime cu ajutorul unei radiații laser focalizate de putere redusă (200 W), în regim continuu. Se constată în urma prelucrării că muchiile tăiate cu fasciculul laser sunt curate, egale și puțin rotunjite fără a necesita prelucrări suplimentare. Prelucrarea se realizează în general cu fascicule laser de putere, puternic focalizate, în undă continuă sau în impuls și se preferă ca eșantionul de sticlă să fie prelucrat în stare caldă, adică să fie introdus într-un cuptor care să permită menținerea unei temperaturi constante pe toată durata prelucrării. O focalizare corespunzătoare a radiației laser va permite prelucrarea unor plăci de sticlă suficient de groase cu o precizie ridicată.

În timpul prelucrării sticlei cu fasciculul laser se formează o flacără din produsele îndepărtate, care trebuie suflată cu jet de aer pentru protecția suprafețelor optice ale elementelor de focalizare. Utilizarea suflării cu gaz a condus la creșterea semnificativă a vitezei de tăiere însă particulele de sticlă topită s-au transformat în particule foarte fine care s-au lipit de suprafața fierbinte a sticlei în apropiere de zona prelucrată, ceea ce a înrăutățit simțitor calitatea acesteia, fenomen nedorit în cazul sticlelor optice. În afară de aceasta, muchiile tăieturii au fost grosiere (figura 2.2).

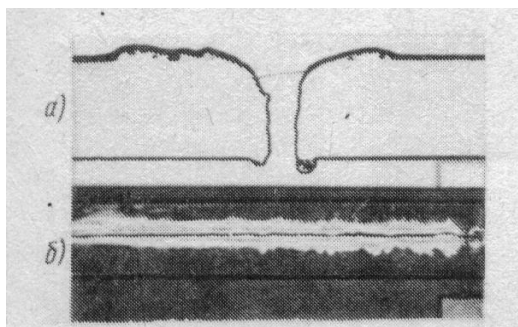


Figura 2.2. Secțiunea a) și aspectul în plan b) al muchiilor sticlei normale în zona prelucrării cu fasciculul laser cu jet de gaz

Din această cauză cercetătorii au renunțat la prelucrarea sticlei prin acest procedeu și și-au îndreptat atenția spre prelucrarea prin vaporizare directă a sticlei. În acest caz, s-a observat experimental că pentru o tăiere de calitate a sticlei încălzite, puterea fasciculului laser trebuie să fie suficient de mare. Așa cum se vede și în *figura 2.3*, la o putere mare a fasciculului laser se obține o suprafață fină a tăieturii (*a*), neuniformitățile suprafeței nedeșășind 3%. Pe măsură ce viteza și respectiv puterea fasciculului laser scade, va fi încălzită o suprafață mai mare de sticlă în apropierea zonei de prelucrare și sub acțiunea greutateii proprii a acesteia se pot forma depuneri de sticlă topită și goluri de gaze (*b*) [13, 49].

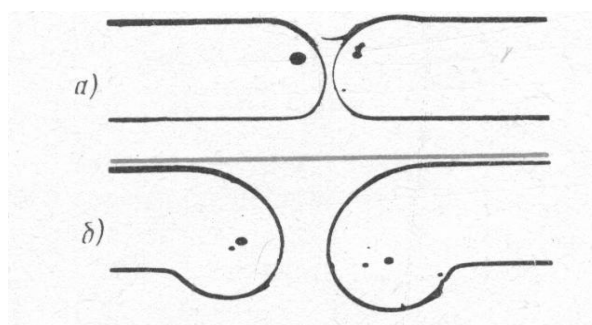


Figura 2.3 Influența puterii fasciculului laser și a vitezei asupra aspectului tăieturii foliei de sticlă normală de grosime 3,25 mm [13]

a) $P_L=14$ kW, $v=76$ mm/s; b) $P_L=6$ kW, $v=19$ mm/s

Pentru aprecierea valorii puterii necesare a fasciculului laser trebuie să cunoaștem lățimea tăieturii care va fi obținută în sticlă datorită interacțiunii radiație laser - material. Aceasta va fi proporțională cu diametrul fasciculului laser. În *figura 2.4* se prezintă dependența diametrului optim al fasciculului focalizat în funcție de puterea fasciculului laser pentru diferite grosimi de sticlă. Se va ține cont și de distanța de la planul de focalizare la suprafața superioară a probei, δ , cât și de viteza de tăiere corespunzătoare puterii date urmărind în final o calitate cât mai bună a suprafeței prelucrate [5, 13]. După optimizarea diametrului fasciculului laser să observăm acum dependența valorii maxime a vitezei de prelucrare funcție de puterea fasciculului laser conform *figurii 2.5*.

Cum se vede din acest grafic, valoarea maximă a vitezei de prelucrare depinde liniar de puterea fasciculului laser și e proporțională cu pătratul grosimii sticlei. Astfel se poate calcula puterea fasciculului laser cu următoarea formulă:

$$P_L=1,8 \cdot 10^{10} \cdot h^2 \cdot v \tag{2.1}$$

în care P_L - puterea fasciculului laser

h - grosimea eșantionului

v - viteza de prelucrare.

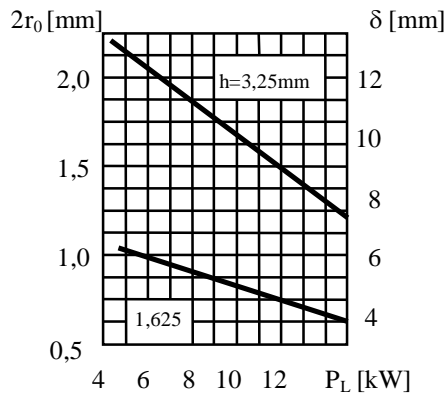


Figura 2.4. Dependenta diametrului optim al fasciculului laser focalizat în funcție de putere pentru diferite grosimi de sticlă [13]

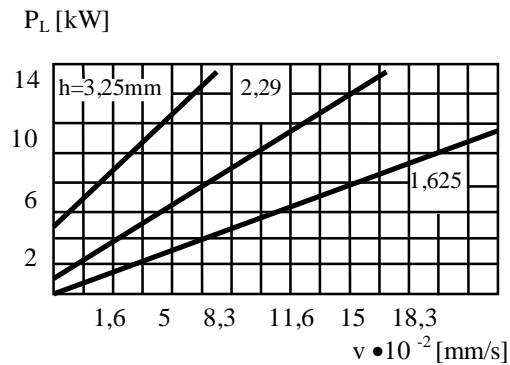


Figura 2.5. Dependenta puterii necesare a fasciculului laser funcție de viteza maximă de tăiere a sticlei tip folie de sticlă

Puterea fasciculului laser necesară pentru asigurarea unei viteze date, crește dacă diametrul fasciculului laser nu este optimal. Astfel, la folosirea unui fasciculului laser de diametru constant, indiferent de puterea fasciculului laser și de viteza de prelucrare, energia fasciculului laser nu va fi dozată corespunzător iar curbele care vor rezulta devin neliniare.

O altă concluzie importantă care se desprinde din acest grafic este faptul că liniile drepte de dependență a vitezei de prelucrare funcție de puterea fasciculului laser nu intersectează originea coordonatelor. Aceasta arată că pentru fiecare grosime a sticlei există un nivel minim de putere sub care prelucrarea devine imposibilă la orice reducere a vitezei de prelucrare. Acest prag de valoare a puterii are loc ca urmare a compensării vitezei de vaporizare a materialului care curge din sticla respectivă sub influența forțelor de tensiune superficială [5], [13].

Pe baza datelor din literatură s-a putut trage concluzia că puterea fasciculului laser variază în limite foarte largi de la câțiva W la zeci de kW, în funcție de sortul de sticlă folosit, de viteza de tăiere, de grosimea sticlei și de diametrul fasciculului laser focalizat. Astfel, pentru obținerea unei prelucrări de calitate, cu cât grosimea sortului de sticlă este mai mică cu atât valoarea puterii fasciculului laser necesar pentru asigurarea unei calități a tăieturii scade foarte rapid. De asemenea, viteza de tăiere e proporțională cu puterea fasciculului laser iar fasciculul laser trebuie să fie suficient de bine focalizat ca să

limiteze volumul de material care se evaporă cât și dimensiunile zonei afectate termic. Volumul de sticlă îndepărtat depinde de valoarea forțelor de tensiune superficială, de adâncimea de topire și de grosimea sticlei [1], [49].

Cercetările făcute [49] au mai scos în evidență și faptul că sticla de cuarț se prelucrează foarte ușor deoarece aceasta nu e supusă influențelor de temperatură ce apar la acțiunea radiației laser concentrate, iar acțiunea jetului laser conduce la vaporizarea SiO_2 la temperatură apropiată de temperatura de topire a sticlei. Astfel nu mai apare o baie lichidă ci se observă doar o topire a marginilor tăieturii în urma căreia rezultă o suprafață polisată. Puterea laser folosită la prelucrarea prin tăiere a sticlei de cuarț variază între 100-200 W în funcție de grosimea piesei.

Pentru sticle obișnuite, puterea laser crește până la valori de ordinul 10 kW, dar tăierea cu fascicul laser a acestora este mai complicată ca proces. În aceste condiții dacă nu se iau măsuri speciale, la aproximativ 3 mm de la marginea topită se formează fisuri longitudinale din cauza tensiunilor din sticlă de la limita zonei influențate termic (ZIT). Pentru evitarea distrugerii după tăiere, sticla se poate introduce în cuptor unde se încălzește rapid din ambele părți până la $t = 600^\circ\text{C}$ de recoacere, pentru îndepărtarea tensiunilor [49].

În [25] se arată că spre deosebire de metale, la materialele ceramice și cu atât mai mult la sticle, conductibilitatea termică fiind mai mică, gradientii de temperatură sunt foarte mari, fapt care determină apariția unor forțe care produc tensiuni ce pot fractura materialul. Pentru sticle, tensiunile ajung să depășească o valoare critică de fisurare la densități la care nu poate fi vorba de găurire și nici măcar de topire. Totuși această fisurare termică indusă de laser și-a găsit o aplicație practică în procesul denumit fracturare controlată. Cu această tehnică se pot decupa anumite contururi (simple) ca rezultat al tensiunilor mecanice obținute prin plimbarea unui fascicul laser (de obicei CO_2 continuu, focalizat) de-a lungul respectivului contur. Unele materiale (în special sticlele moi) dau rezultate mai puțin reproductibile, alte materiale (cum sunt ceramicile sinterizate) pot da rezultate fiabile.

2.2 Aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor optice

În cele ce urmează se prezintă unele preocupări actuale privind aplicația laserilor la prelucrarea sticlelor optice, un domeniu puțin abordat în literatura de specialitate.

Sticla de silice de puritate mare (SiO_2) este utilizată într-o varietate mare de aplicații în tehnologiile optoelectronice moderne. Nu este numai un material cheie pentru fibrele optice cu pierderi mici prin reflexie, dar și un material crucial pentru litografie laser cu excimeri. Odată cu mărirea timpului de utilizare, mediile în care era folosită sticla de silice au devenit din ce în ce mai ostile. Astfel, cercetările făcute cu privire la formarea defectelor [32] cauzate de energia fonică ridicată sau de raze radioactive au devenit foarte importante. În acest sens studiile efectuate pe sticlă de silice de puritate mare și respectiv pe sticle optice (sticlă borosilică de bariu, sticlă borosilică și sticlă de silicat de plumb) iradiate cu un fascicul laser cu excimer KrF ($0,248 \mu\text{m}$) la 5 eV au arătat că forma defectului indus de radiație este diferită. Așadar, în cazul sticlei de silice și sticlei borosilice defectul este sub formă de fisură, pe când la sticla borosilică de bariu și la sticla de silicat de plumb acesta se prezintă sub forma unei creștături. Aceste experimente au demonstrat că mecanismul de distrugere a unei piese este diferit și depinde de energia absorbită în procesul de prelucrare și au permis cunoașterea influenței defectului indus de laser în emisia luminoasă (vizibilă) [64].

Alte studii interesante s-au făcut pentru eșantioane de sticlă de tip BK7 și Zerodur, acoperite cu un strat metalic fin de Al de 80-100 nm, supuse contaminării cu praf de mai multe ori pe o perioadă între 3 și 12 luni. Principala contaminare a acestor eșantioane a fost cu nisip cuarțos de dimensiuni ale particulelor care variau de la câțiva μm la câteva sute de μm și ceva urme de apă. Eșantioanele contaminate au fost curățate cu ajutorul unui laser cu excimer KrF în regim pulsant. S-a observat o creștere a reflectivității peliculei de Al cu aproape 12% în urma curățării cu radiație UV. O importanță deosebită în acest proces a avut-o și umiditatea care a dus la detașarea ușoară a particulelor de nisip din zona prelucrată [50].

O aplicație mai apropiată de subiectul acestei teze de doctorat s-a realizat în ceea ce privește lustruirea sticlelor optice în [72]. Se consideră aici că, prelucrarea materialelor bazată pe topirea sau înmuierea unui strat subțire de la suprafață și solidificarea mai

târziu a acestuia este un subiect de interes pe termen lung. Această tehnică este utilizată pentru a mări sau modifica proprietățile suprafeței și în particular, pentru a șlefui suprafețele rugoase. Lustruirea sau micșorarea rugozității suprafeței apare datorită deplasării tensiunilor suprafeței în statul topit sau înmuiat.

Lustruirea cu laser a sticlei este o posibilitate deosebit de atractivă din punct de vedere industrial deoarece, pe lângă posibilitatea automatizării procesului de prelucrare permite și îmbunătățirea eficienței producției la componentele standard. Această tehnică se potrivește în special obținerii suprafețelor optice lustruite asferice și care nu sunt de revoluție, care sunt foarte greu sau uneori chiar imposibil de lustruit prin tehnici tradiționale.

În aplicațiile laser care implică materiale cu conductivitate termică joasă ca sticla, efectele interferențiale produse prin suprapunerea diferitelor segmente de fronturi de undă, se traduc printr-o distribuție neuniformă a temperaturii cu gradienti termici transversali ridicați, care durează suficient de mult pentru a induce tratamente termice neregulate și/sau efecte nedorite ca deformările macroscopice permanente ale suprafeței.

În [72], autorii se ocupă cu lustruirea sticlei optice pe suprafețe relativ mari ($\approx 5000 \text{ mm}^2$) prin iradiere cu laser CO_2 ($\lambda=10,6 \text{ }\mu\text{m}$) de mare putere (2 kW), cu o distribuție modală TEM^*_{01} . Sticla are un coeficient de absorbție foarte ridicat la lungimi de undă din IR mai mari de $5 \text{ }\mu\text{m}$, valoarea măsurată a acestuia fiind în domeniul 10^5 m^{-1} . Mai mult, reflectivitatea sticlei la $10,6 \text{ }\mu\text{m}$ este în jur de 20% și de aceea eficiența energiei globale a iradierii laser cu CO_2 este mult mai mare pentru sticlă decât pentru metale. Astfel când radiația emisă de un laser cu CO_2 are influență asupra suprafeței sticlei, o mare cantitate de energie este absorbită într-un strat subțire de suprafață, iar tratamentul laser poate fi restrâns doar la suprafața sticlei. Deoarece volumul eșantionului de sticlă nu este afectat, este posibil să fie lustruit fără a modifica parametrii curbei date.

Scopul articolului [72] a fost aplicarea pe scară largă a metodei de lustruire, motiv pentru care s-a folosit un fascicul laser de putere mare care să permită baleierea pe o suprafață de sticlă optică la fel de mare ca suprafața unei lentile. Căldura indusă în piesa optică a fost controlată în timp real cu ajutorul a doi senzori electro-optici care au măsurat distribuția temperaturii la suprafață și în adâncime datorată iradierii cu radiație IR a eșantionului de sticlă optică. Pentru lustruire, valorile temperaturii la suprafața sticlei

trebuie să fie peste 1000°C, deoarece doar pentru aceste valori, coeficientul de vâscozitate al sticlei este suficient de mic ($\leq 10^4$ Pa · s) pentru a fi stabilită tensiunea superficială din masa fluidă. Totuși, pentru a evita deformarea globală, valorile temperaturii în volumul eșantionului trebuie menținute sub temperatura de înmuiere a sticlei ($\approx 650^\circ\text{C}$), dar peste temperatura de transformare ($T_g=530^\circ\text{C}$) deoarece la această temperatură coeficientul de dilatare termică crește brusc și furnizează tensiuni interne în piesă care pot duce la distrugerea acesteia. De asemenea, după prelucrarea cu laser, în timpul răcirii, temperatura eșantionului trebuie să treacă prin punctul de transformare într-o direcție controlată, urmând un ciclu tipic de revenire. Pentru a satisface aceste nevoi, tratamentul laser s-a efectuat în incinta unui cuptor care a permis controlarea temperaturii piesei în timpul prelucrării.

Eșantioanele tratate au fost piese circulare ($d = 80$ mm) de sticlă optică crown albă TRC-33, cu suprafețe concave și sferice, cu rază de curbura de la 60 la 255 mm. Au fost studiate eșantioane cu diferite rugozități ale suprafeței inițiale, rugozitatea maximă fiind de 500 nm.

Rezultatele prelucrării au arătat că rugozități până la 500 nm au fost eficient diminuate la valori finale ale rugozității în jurul valorii de 1 nm. Pe de altă parte, undulațiile care sunt deja prezente la suprafața sticlei datorită procesului de șlefuire, pot fi cu greu reduse.

Diferența dintre eficiența ridicată a tratamentului laser pentru a elimina rugozitatea și capacitatea scăzută a acestuia de a reduce undulația, pot fi înțelese luând în considerare faptul că cu cât e mai mare înclinația defectului suprafeței cu atât eficiența tensiunilor superficiale conduse în masă este mai mare [72].

2.3 Aplicațiile laserilor la prelucrarea materialelor polimerice parțial transparente

În timp ce laserii au fost utilizați de zeci de ani la etichetarea și inscripționarea elementelor metalice, aplicarea luminii coerente la marcarea materialelor plastice este o metodă relativ nouă. În ultimii cinci ani această metodă de prelucrare a luat amploare

datorită înlocuirii metalelor în multe din aplicații cu materiale copolimerice acetal sau rășini tehnologice.

Pentru tinerii proiectanți, decorarea, etichetarea, marcarea sau codificarea unor elemente turnate din rășini acetal dure a fost o provocare. Este foarte dificil de exemplu, de a realiza o acoperire cu un strat de vopsea pe rășini acetal fără a face în prealabil un tratament de suprafață și de a utiliza substanțe chimice dure. Chiar dacă cerneala aderă pe suprafața materialului plastic, marcarea realizată poate fi ușor îndepărtată sau distrusă în timpul utilizării.

Gravarea laser a unui material plastic crează marcaje rezistente, dar acestea sunt tipice doar simbolurilor șterse, cu contrast slab. Aditivii amestecați în rășinile industriale pot îmbunătăți marcarea laser dar cu costuri datorate modificării proprietăților mecanice. Pentru optimizarea marcării laser a acetalilor, firma de polimeri Hoechst Technical Polymers (HTP) din Summit, NJ, s-a alăturat producătorilor de laseri de marcăre Rofin-Baasel Inc., din Acton, MA și The Sabreen Group din Plano, Texas. Efortul acestora a dus la utilizarea rășinilor, aditivilor, laserilor și software-ului pentru rezultate mai bune ale marcării, păstrând toate proprietățile materialului. HTP a introdus două noi tipuri de materiale copolimerice acetal Ceclon® care pot fi marcate cu laser și care au fost folosite atât în scop general cât și în aplicații în care acestea trebuiau să aibe stabilitate la radiații UV. Aceste materiale au permis realizarea unor elemente de marcăre rezistente, a căror grafică și contrast alfanumeric ridicat au fost obținute fără sacrificarea proprietăților materialului rășinii de bază. Prelucrarea prin marcăre laser a acestor materiale prezintă avantaje economice față de tipărirea și etichetarea convențională.

Spre deosebire de procedeul de marcăre al materialelor metalice, marcăre laser a materialelor plastice necesită tehnici diferite și abordarea corespunzătoare a procedeului pentru fiecare material în parte [30], [31], [38...41]. Datorită proprietăților polimerilor de absorbție a radiației laser (exemplu: ABS și policarbonat) se pot realiza marcaje cu contrast relativ ridicat. Alte materiale de tipul rășinilor (copolimer acetal, PPS și câteva tipuri de nailoane) au fost mai greu de marcat.

Actualmente marcăre laser e aplicată cu succes în electronică, unde inscripționează logosuri și simboluri funcționale permanente și în industrie la etichetarea plăcuțelor atașate motoarelor și reductoarelor.

Față de metodele uzuale de marcarea materialelor plastice (acoperire cu cerneală, imprimare cu jet de cerneală, umplere cu cerneală, imprimare prin sublimare, în relief sau la cald), prin marcarea laser se obțin caractere sau desene permanente (ce nu pot fi distruse datorită mediului sau altor condiții în funcționare a acelor piese), fără a mai fi necesare vopsele sau cerneluri și fără un contact direct cu piesele prelucrate. Mai mult, nu mai sunt necesare o pre- sau post-tratare a acestor elemente, utilizarea solvenților, filierelor de cerneală sau a suporturilor de transfer deoarece, singurele consumabile la marcarea laser sunt electricitatea și apa. Această marcarea asigură prelucrări precise și pe suprafețe curbe sau neregulate.

Laserii cei mai folosiți în gravarea unor astfel de materiale plastice sunt laserii cu Nd-YAG, CO₂ și excimerii. Fasciculul laser poate fi proiectat printr-o mască și/sau direcționat de galvanometre, fiind apoi focalizat pe suprafața piesei de prelucrat.

Laserii Nd-YAG pot fi în undă continuă, Q-switched sau pulsați iar laserii cu CO₂ și excimerii pot fi pulsați sau modulați în sisteme matriciale punctiforme. Cu astfel de laseri se pot obține caractere foarte mici, cu o înălțime de 0,254 mm.

Pentru ca radiația laser să realizeze gravarea materialelor plastice, energia fasciculului laser trebuie absorbită pentru a genera căldură. Substraturile prea reflectante pentru o anumită lungime de undă a radiației laser pot fi uneori marcate dacă se ajustează puterea laser, durata pulsului sau viteza fasciculului laser în mișcare. Datorită faptului că majoritatea materialelor plastice absorb radiația laser de lungime de undă $\lambda=1,064 \mu\text{m}$, laserii cu Nd-YAG sunt cei mai utilizați la marcarea acestor materiale în industrie.

Laserul cu Nd-YAG crează marcarea prin topirea și expandarea (foaming) suprafeței polimerului prelucrat. Reacția termochimică lasă urme de gravare alb-luminoase de 40 μm lățime în piesele de culoare închisă. Ajustând frecvența și puterea, cantitatea de material topit poate fi controlată astfel încât culoarea marcajului să fie mai închisă. Pentru a mări contrastul marcării laser la rășini, se folosește mica sau alți aditivi.

Una din aplicațiile din industria de automobile a fost aceea a unei fațete radio de culoare neagră din copolimerul acetal Celcon pe care s-au gravat numere și simboluri alb-luminoase. Înaintea gravării laser, inscripționarea cu culoare albă pe suporturi închise la culoare s-a făcut cu ajutorul unui ac hipodermic pe o suprafață gravată, urmând ca

Capitolul 2. Stadiul actual privind aplicațiile laserilor la prelucrarea materialelor optice parțial transparente

curățarea pieselor să se facă manual. Alți polimeri folosiți au fost Celcon LM90 și LM90Z pe care s-au obținut contraste ridicate de marcaje albe pe suport negru.

În prezent, laserii cu Nd-YAG pot produce marcaje albastru deschis pe suport albastru închis sau alte astfel de combinații.

Eficiența și flexibilitatea sistemului de marcarea laser s-au îmbunătățit odată cu implementarea sistemului de prelucrare computerizat care controlează întregul proces de prelucrare prin datele introduse la intrare. Instrucțiunile pot fi transmise laserului de la o bază de date standard sau prin pachete de programe de proiectare asistată. Schimbarea datelor sau a unei imagini se face în mai puțin de un minut, ceea ce duce la o productivitate ridicată în procesele de prelucrare prin marcarea laser.

Diferența cheltuielilor de capital, economii la consumabile, creșterea productivității și reducerile consecutive de rebuturi fac ca un sistem laser să poată fi amortizat în mai puțin de un an (*tabelul 2.1*).

Tabelul 2.1. Compararea costurilor pentru marcarea cu cerneală și marcarea laser cu Nd-YAG [82]

Categoriile de cheltuieli	Costuri directe pentru suportul de tipărire [\$]	Costuri pentru marcarea laser cu Nd-YAG [\$]
Cheltuieli cu echipamentul	80 000	60 000 – 120 000
Consumabile anuale	25 000 – 45 000	6 500 sau mai puțin
Costuri anuale pentru plăci și costuri intangibile	175 000 – 250 000	0

3. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Din literatura de specialitate rezultă că nu există referiri cu privire la prelucrarea diferitelor sorturi de sticle optice cu radiație laser și implicațiile acestor prelucrări. Prezenta teză de doctorat își propune să aducă o modestă contribuție în acest domeniu, având ca obiective finale prioritare:

- *științific* - determinarea condițiilor de „acordare” a proprietăților fasciculului laser (FL) cu proprietățile optice specifice materialului supus prelucrării astfel încât minimul de absorbție necesar prelucrării să fie asigurat, fără a induce defecte sau modificări optice și/sau structurale majore în material;
- *tehnologic* - realizarea cu laser a unor operații tehnologice (de ex. tăiere, găurire, gravare, marcare) irealizabile performant și eficient cu alte tehnologii și optimizare.

În esență teza se vrea a fi un studiu cât mai complex cu privire la prelucrarea pieselor optice (sticle optice și polimeri parțiali transparenți) cu radiație laser IR, utilizând diferite condiții de cuplare. Astfel, s-au ales trei sorturi diferite de sticlă: BK7, SF5, TF101, stabile la radiații (care nu își modifică parametrii optici decât dacă lungimea de undă se modifică) utilizate frecvent în industria optică și respectiv doi polimeri transparenți în spectrul vizibil: polimetil metacrilatul și policarbonatul, care tind să ocupe un loc tot mai important în industria optică ca înlocuitori ai sticlelor optice. Materialele optice parțial transparente au fost studiate separat stabilindu-se următoarele obiective principale pentru ca prelucrarea cu radiație laser a materialelor să aibe loc și pentru a se putea realiza optimizarea procesului de prelucrare:

1. Stabilirea condițiilor optime la prelucrarea cu laser a sticlelor optice/polimerilor optici în funcție de caracteristicile instalației laser.
2. Stabilirea tuturor factorilor de influență care intră în proces, atât datorată instalației cât și materialului utilizat.
3. Stabilirea condițiilor de cuplare a radiației laser cu materialul ales (prin acoperirea pieselor cu straturi reflexe sau absorbante sau prin modificarea rugozității suprafeței piesei prelucrate).
4. Studiarea interacțiunii radiației laser-materiale optice și analizarea efectelor induse de radiația laser în materiale, în special în zona influențată termic.
5. Modelarea matematică a procesului de prelucrare în vederea optimizării.

4. MATERIALE UTILIZATE

STICLE OPTICE SI POLIMERI OPTICI

4.1. Sticlele optice

4.1.1. Introducere

Întrucât în literatura de specialitate nu se fac referiri directe la prelucrarea cu laser a unor sorturi de sticlă optică, considerăm că în cazul acestora problemele sunt puțin diferite. Și aceasta deoarece, sticla optică prezintă o calitate ridicată față de sticla obișnuită, asigurată de toleranțe apropiate pentru parametrii nominali, constante optice de bază (indice de refracție și coeficient de dispersie), absorbția luminii, omogenitatea optică, birefringență, striaiții și bule.

Este necesar în acest sens să cunoaștem caracteristicile și proprietățile importante ale sticlelor optice care sunt total diferite de cele ale materialelor prelucrate până în prezent cu laser dar care, sunt apropiate de cele ale sticlelor obișnuite, despre care se cunosc câteva date concrete privind prelucrarea cu radiație laser. În cele ce urmează ne vom referi doar la sticlele optice incolore acestea făcând obiectivul acestei teze, deoarece sunt cele mai utilizate în industrie iar datorită transparenței lor permit o interpretare corectă a experimentelor efectuate.

Se cunoaște astfel că sticla optică incoloră reprezintă principalul material nemetalic luat în considerare la proiectarea sistemelor optice laser. Este o sticlă cu compoziție specială, omogenă, cu valori constante în timp ale proprietăților optice, cu indice de refracție cuprins între 1,37 și 2 și cu coeficientul de dispersie cuprins între 20 și 90, cu transmisie neselectivă în domeniul vizibil al spectrului de radiații optice [60], [62].

Sticla optică incoloră rezistentă la radiații ionizate este un sortiment de sticlă incoloră a cărei densitate optică se modifică în limite prescrise, în urma iradierii în condiții prestabilite.

Din punct de vedere chimic, sticla optică este o substanță anorganică pe bază de dioxid de siliciu, obținută prin încălzire și apoi răcire fără să cristalizeze. În timpul topirii se adaugă oxizi (boric, fosforic, de plumb, bariu etc.) care imprimă proprietățile optico-mecanice ale sticlei. Sticla optică incoloră anorganică este componenta de bază a

instrumentelor optice [60]. Aceasta este folosită la prelucrarea lentilelor, prismelor, a lamelelor sau plăcilor plan paralele și la diferite alte instrumente de măsură și control, camere fotografice și aparate de proiecție, sisteme automate și vizuale de recepție a luminii, aparate de transmisie și transformare a luminii.

4.1.2. Materia primă folosită la obținerea sticlelor optice

Pentru obținerea sticlei optice se folosesc circa 80 de elemente chimice, fiecare din acestea având o influență determinată asupra proprietăților sticlei. Compoziția sticlelor se exprimă în procente de oxizi ai elementelor componente. De exemplu, 75% bioxid de siliciu (SiO_2), 15% oxid de sodiu (Na_2O) și 10% oxid de calciu (CaO). Materialele care constituie materia primă pentru fabricarea sticlei se împart în: materiale principale și auxiliare. Materialele principale sunt: oxizii acizi, oxizii metalelor alcaline, oxizii metalelor alcalino-pământoase și alți oxizi. Materialele auxiliare care intră în amestecul pentru obținerea sticlei au ca scop limpezirea masei sticloase, colorarea sticlei, accelerarea procesului de topire a sticlei, îmbunătățirea calității masei sticloase etc.

Impuritățile dăunătoare calității sticlei sunt oxizii de crom, de titan, de fier care colorează sticla și îi micșorează transparența. Pentru eliminarea acestor impurități, materia primă naturală, fărâmițată sub formă de făină (granule), este supusă îmbogățirii, uscării și cernerii [62].

4.1.3. Clasificarea sticlelor optice

Pentru stabilirea tipului de sticlă optică se folosesc doi parametrii optici: indicele de refracție (n_d) și numărul lui Abbé sau coeficientul de dispersie (v_d). Astfel sticlele optice se împart în:

Sticle cron cu conținut de potasiu, simbolizate prin litera C (K), cu indicele de refracție n_D mic și coeficientul de dispersie v_D (v_d), mare. Valorile limită ale acestor parametrii pentru sticlele cron sunt:

$$n_D = 1,50 \div 1,56; v_D = 50 \div 65(70); \text{ în funcție de compoziția chimică.}$$

Sticle flint, având în compoziție silicați de plumb, potasiu ș.a., simbolizate cu litera F și având un indice de refracție n_D mare și coeficientul de dispersie (Abbé) v_D (v_d), mic. Valorile limită ale acestor parametrii pentru sticlele flint sunt:

$$n_D = 1,52 \div 1,75(1,80); v_D = 32 \div 52 .$$

Există și sorturi intermediare de sticlă numite **cron - flint** simbolizate cu literele CF (KF), cu $n_D = 1,5 \div 1,55$ și $v_D = 47 \div 58$.

Grupele principale de sticlă se împart în mai multe clase: cron; cron cu bariu (BaC), cron ușor (CU)sau (LK); flint greu (FG); flint cu bariu (BaF); flint ușor (FU) sau (LF); bor cron (BK).

Sticla optică prezentată în catalog este clasificată în clase corespunzătoare poziției lor în câmpul de coordonate al diagramei sticlei optice care ține cont de indicele de refracție (n_e) și de numărul lui Abbé (v_e). Indicele de refracție se definește ca raportul vitezelor luminii în aer și în sticlă. El variază cu lungimea de undă a luminii.

În *tabelele 4.1 și 4.2* se prezintă câteva sorturi de sticlă optică cu simbolizarea corespunzătoare.

Tabelul 4.1. Sorturi de sticle optice germane [83]

Tipul sticlei	Simbol
Fluor Kron	FK
Kron ușor	LK
Fosfat Kron	PK
Fosfat Kron greu	PSK
Bor Kron	BK
Kron	K
Zinc Kron	ZK
Barit Kron ușor	BaLK
Barit Kron	BaK
Kron greu	SK
Lantan Kron	LaK
Lantan Kron greu	LaSK
Kron Flint	KF
Barit Flint ușor	BaLF
Kron foarte greu	SSK
Flint dublu ușor	LLF
Barit Flint	BaF
Kurz Flint	KzF
Lantan Flint	LaF
Lantan Flint ușor	LaLF
Flint ușor	LF
Flint	F
Barit Flint greu	BaSF
Flint greu	SF

Tabelul 4.2. Sorturi de sticle optice rusești [78]

Tipul sticlei	Simbol
Kron ușor	LK
Fosfat Kron greu	TFK
Kron	K
Fosfat Kron	FK
Bariu Kron	BK
Kron greu	TK
Kron foarte greu	STK
Kron special (cu valori speciale ale dispersiei)	OK
Kron Flint	KF
Bariu Flint	BF
Bariu Flint greu	TBF
Flint ușor	LF
Flint	F
Flint greu	FF
Flint foarte greu	STF
Flint special (cu valori speciale ale dispersiei)	OF

Clasele OK și OF pot fi găsite în orice regiune a câmpurilor diagramei ocupate de crown-uri și respectiv flint-uri.

Clasele de sticlă mai sus menționate sunt furnizate clienților într-o versiune rezistentă la radiații (constante optice de bază plus rezistență ridicată la radiație gamma, specificate în catalog printr-o notă care declară că un anumit sort de sticlă optică este rezistent la radiații gamma). Proprietățile acestor clase diferă foarte puțin de cele ale claselor principale.

4.1.4. Proprietățile sticlelor optice

Pentru fabricarea pieselor optice necesare aparatelor optico-mecanice în prezent se folosesc peste 100 de sortimente de sticlă optică incoloră, care se deosebesc între ele după proprietățile optice, fizico-chimice, mecanice și termice.

4.1.4.1. Proprietățile optice ale sticlei

Proprietățile sticlelor optice se discută în raport cu refracția, dispersia și transmisia luminii. Pentru obținerea unor caracteristici specifice anumitor sorturi de sticlă optică, în compoziția acestora, pe lângă oxizii acizi SiO_2 , oxizii bazici de tip Na_2O , CaO , care sunt nelipsiți, se introduc în anumite proporții corespunzător scopului, următoarele substanțe: Al_2O_3 , TeO_2 , ZrO_2 , Li_2O_3 , K_2O , MgO , BaO , PbO , B_2O_3 ș.a.

În cataloagele firmelor producătoare de sticle optice se dau caracteristicile acestora, dintre care cele mai importante sunt:

- indicele de refracție ($n = 1,45 - 2$)
- dispersia principală ($\Delta n = n_F' - n_C'$)
- dispersia medie ($\Delta n = n_F - n_C$)
- dispersia parțială (dn_λ)
- dispersiile principale relative (θ_λ)
- coeficientul de dispersie (numărul lui Abbé- v_λ).

➤ Constantele optice

Luete ca și constante optice avem: indicele de refracție la diferite lungimi de undă, precum și derivații acestuia, ca de exemplu dispersia, coeficienții de dispersie și dispersiile parțial relative, care pot fi găsite în specificațiile fiecărei clase de sticlă optică.

a) Indicii de refracție

Indicii de refracție sunt dați pentru lungimile de undă a 23 de linii spectrale ale elementelor chimice și pentru 12 lungimi de undă generate de cei mai utilizați laseri (tabelele 4.3 și 4.4).

Indicele de refracție (n_e) la o lungime de undă de $0,5460 \mu\text{m}$ care este în apropierea sensibilității maxime a ochiului uman ($\lambda=0,555 \mu\text{m}$) este cunoscut ca indice de refracție principal. Pentru o ușoară citire a indicelui de refracție (n_e), acesta este prezentat într-o coloană separată în partea superioară a fiecărei clase specificate în catalog împreună cu indicele de refracție principal folosit anterior (n_d) la o lungime de undă de $0,5875 \mu\text{m}$ (corespunzător radiației He) [44]. Indicii de refracție dați în catalog au fost obținuți prin măsurări goniometrice (măsurarea valorii unghiurilor), măsurările în regiunea vizibilă fiind conduse vizual iar cele din regiunile infraroșu și ultraviolet cu ajutorul fotocelulelor.

$n_e \in [1,365 - 2,186]$ - în cazuri deosebite poate atinge valori mai mari (până la 4). Majoritatea valorilor pentru indicii de refracție se încadrează în domeniul $[1,50 - 1,80]$. Prezintă importanță deosebită indicii de refracție pentru radiațiile F', F, C', C.

În S.U.A. și Canada indicele de refracție principal era considerat n_D , pentru $\lambda_D=0,5892 \mu\text{m}$ (corespunzător radiației Na).

Tabelul 4.3. Lungimea de undă a liniilor spectrale [78]

Lungimea de undă λ [μm]	Simbolul liniei spectrale	Elementul chimic	Banda spectrală
0,3126	U2	Hg	UV
0,3341	U1	Hg	Ultraviolet
0,3650	I	Hg	
0,3888	H	He	Violet
0,4043	H	Hg	
0,4358	G	Hg	
0,4678	F	Cd	Albastru
0,4799	F'	Cd	
0,4861	F	H	
0,5085	E	Cd	Verde
0,5460	E	Hg	
0,5875	D	He	Galben
0,5892	D	Na	
0,6438	C'	Cd	
0,6562	C	H	Roșu
0,6678	P	He	
0,7065	R	He	
0,7682	A'	K	
0,7800	R	Rb	
0,8521	I1	Cs	
1,0139	I2	Hg	
1,1286	I3	Hg	
1,3951	I4	Hg	Infraroșu
1,5296	I5	Hg	
1,8131	I6	Hg	
1,9701	I7	Hg	
2,2493	I8	Hg	
2,3254	I9	Hg	

Tabelul 4.4. Lungimea de undă a laserilor [78]

Lungimea de undă λ [μm]	Elementul chimic	Matriță	Bandă spectrală
0,3507	Kr		UV
0,3564	Kr		Albastru verde
0,4880	Ar		
0,5140	Kr		Verde
0,5208	Kr		
0,5300	Nd	Sticlă sau cristal, de exemplu YAG	
0,5682	Kr		Galben
0,6328	He-Ne		Roșu
0,6471	Kr		
0,6943	Cr	Safir	
0,8900			IR
1,0600	Nd	Sticlă sau cristal, de exemplu YAG	

b) Dispersia

Dispersia luminii reprezintă fenomenul de dependență a indicelui de refracție al sticlei optice de lungimea de undă a radiației luminoase.

Există cinci coeficienți de dispersie $v_3 = \frac{n_3 - 1}{n_1 - n_2}$ (4.1) pentru diferite zone

spectrale:

$$v_h = \frac{n_h - 1}{n_i - n_g} \quad (4.2)$$

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} \quad (4.3)$$

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (4.4)$$

$$v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (4.5)$$

$$v_{1529,6} = \frac{n_{1,2296} - 1}{n_{1,0139} - n_{2,2493}} \quad (4.6)$$

Aici v_e este numărul lui Abbé care se folosește în mod curent iar v_d numărul lui Abbé folosit anterior. Ambele valori sunt date în catalog în coloane separate în partea superioară a fiecărei clase specificate.

Reprezentarea grafică a lui n în funcție de λ determină curba de dispersie a sticlei optice, care este redată în figura 4.1.

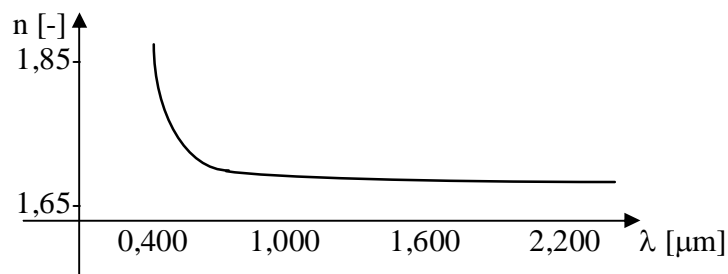


Figura 4.1. Dependența indicelui de refracție de lungimea de undă

c) Spectrul secundar

În catalog sunt incluse și abaterile dispersiilor parțial relative și respectiv a coeficienților de dispersie de la linia „normală” pentru patru segmente ale regiunilor ultraviolet și vizibil. În toate cazurile aceste segmente sunt limitate la unul din capete de linia F' sau F. Prin linie „normală” este aici înțeles următorul lucru: dacă pe un grafic sunt reprezentate dispersiile parțial relative calculate pentru aceeași lungime de undă comparativ cu coeficientul de dispersie v , toate punctele se vor găsi în apropierea unei linii drepte.

$$P_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_3 - n_4} \quad (4.7)$$

Dacă această linie este presupusă prin convenție a fi „normală”, atunci clasele de sticlă ale căror coordonate se găsesc exact pe această linie se supun următoarelor ecuații:

$$P_{1,2} = a_{1,2} + b_{1,2} v \quad (4.8)$$

sau
$$v = -\frac{a_{1,2}}{b_{1,2}} + \frac{1}{b_{1,2}} P_{1,2} \quad (4.9),$$

în timp ce clasele ale căror coordonate nu se găsesc pe această linie se supun ecuațiilor:

$$P_{1,2} = a_{1,2} + b_{1,2} v + \Delta P_{1,2} \quad (4.10)$$

sau
$$v = -\frac{a_{1,2}}{b_{1,2}} + \frac{1}{b_{1,2}} P_{1,2} + \Delta v_{1,2} \quad (4.11).$$

Linia „normală” este ilustrată în figura 4.2.

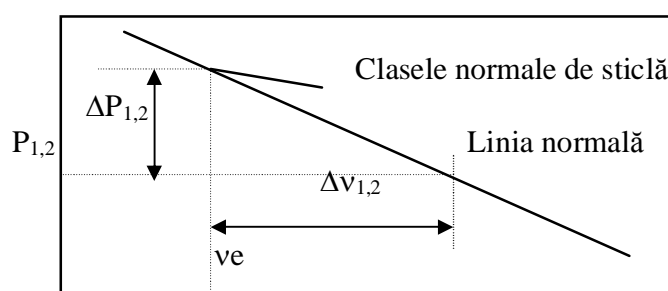


Figura 4.2. Linia normală a dispersiilor parțial relative [78]

Linia „normală” și constantele corespunzătoare $a_{1,2}$ și $b_{1,2}$ sunt determinate din valorile $P_{1,2}$ și v a două clase de sticlă, care sunt selectate astfel încât liniile drepte care trec prin acestea în toate regiunile spectrale să fie aproximativ mediane pentru toate punctele claselor standard existente.

Aceste date sunt necesare pentru a evalua clasele sticlei în măsura în care ne interesează efectul lor asupra spectrului secundar al sistemului optic și pentru a selecta clasele sticlei pentru sistemele optice cu un spectru secundar redus.

➤ **Transmitanța**

Transmitanța sticlei optice are o valoare mare în domeniul 0,450 - 1,000 μm. Pentru radiații cu lungimi de undă $\lambda < 0,450$ μm sorturile cu indici de refracție mari prezintă valori superioare ale coeficientului de absorbție.

Se menționează faptul că exceptând sticla optică din cuarț topit celelalte sorturi de sticlă optică nu sunt recomandate sub 0,4 μm respectiv peste 4,0 μm.

Pentru a caracteriza transmitanța, firmele producătoare de sticlă optică au introdus factorul de transmisie spectrală internă ($\tau_{i\lambda}$), definit ca raportul dintre fluxul radiant la ieșire $(\Phi_{e\lambda})_{ex}$ și fluxul radiant la intrare $(\Phi_{e\lambda})_{in}$, pierderile datorate reflecției de la suprafețele exterioare fiind excluse.

$$\tau_{i\lambda} = \frac{(\Phi_{e\lambda})_{ex}}{(\Phi_{e\lambda})_{in}} \quad (4.12)$$

Factorul transmisiei spectrale (τ_λ) este definit ca raportul fluxului radiant $(\Phi_{e\lambda})\tau$ ce trece prin sticlă la fluxul radiant incident $\Phi_{e\lambda}$.

$$\tau_\lambda = \frac{(\Phi_{e\lambda})\tau}{\Phi_{e\lambda}} \quad (4.13)$$

Factorul de transmisie internă ($\tau_{i\lambda}$) și factorul de transmisie τ_λ sunt incluși în următoarea relație:

$$\tau_\lambda = R_m \cdot \tau_{i\lambda} \quad (4.14).$$

Simbolul R_m este luat în considerare doar pentru pierderile prin reflecție ale luminii pe cele două suprafețe. Acesta este un indicator pentru indicii de refracție al sticlei.

➤ **Variații în transmisie datorate radiației puternice**

Sticla optică normală expusă la radiație puternică prezintă o colorație mai mult sau mai puțin intensă. Sub efectul unor radiații, sticla optică formează centre de culoare

(de exemplu sticla de silice devine brună). Adăugarea ceriului reduce acest efect (protejează sticla față de radiații).

Sticla protejată are un coeficient de absorbție mai mare în domeniul lungimilor de undă mici. Efecte similare de colorare a sticlei apar și în cazul acțiunii radiației UV (înnegrire) sau a radiației solare - solarizarea (care determină apariția culorii purpurii). Aceste fenomene influențează transmisia luminii.

Pentru a caracteriza variațiile în transmisie datorate radiației, în catalogul de sticlă optică au fost incluse densitatea optică D_0 a sticlelor de 10 mm grosime și incrementul acesteia ΔD în cazul iradierii cu doze de 10^4 și 10^5 R:

$$\Delta D = D - D_0, \quad (4.15)$$

în care D este densitatea optică după iradierea cu o doză de 10^4 sau 10^5 R.

4.1.4.2. Proprietățile chimice ale sticlei

Rezistența chimică a sticlei arată rezistența acesteia la factorii care stimulează efectul mediului înconjurător pe suprafața lustruită a unui component optic.

Rezistența chimică este importantă și pentru alegerea corectă a condițiilor pentru tratamentele mecanice și chimice ale sticlei. Pentru evaluarea rezistenței chimice a sticlei sunt folosiți doi agenți și anume - o atmosferă umedă, adică vapori de apă necondensați și soluții acide apoase slabe. Acești agenți influențează sticla în diferite moduri în funcție de compoziția chimică a acesteia [78], [83].

4.1.4.3. Proprietăți termice ale sticlei

Temperatura are o influență hotărâtoare asupra caracteristicilor optice ale sticlei, fiind un factor determinant al tehnologiei de fabricație și al stabilității constantelor optice în exploatare.

Domeniul de temperaturi la care se formează sticla este cuprins pentru majoritatea sorturilor între 400°C și 600°C . Viteza de răcire de la temperatura de 600°C la temperatura camerei trebuie aleasă adecvat pentru a se asigura o tranziție lentă (de mai multe săptămâni) de la faza lichidă la faza solidă.

Prin aceasta se reduc tensiunile interne (evitându-se pericolul spargerii și deformării sticlei precum și al apariției fenomenului de birefrință) și se asigură o

fixare a moleculelor într-o rețea densă - condiție a obținerii unui indice de refracție ridicat.

Indicele de refracție este dependent de temperatură atât datorită dilatării sau contracției materialului (dilatarea determină o micșorare a indicelui de refracție) cât și datorită deplasării limitei de absorbție din domeniul UV al spectrului către domeniul vizibil (ceea ce are ca efect o creștere a indicelui de refracție).

Primul efect este important a se lua în considerare în special pentru sticlele kron (care au limita de absorbție în domeniul UV îndepărtat) pentru temperaturi joase iar al doilea efect prezintă importanță în cazul sticlelor flint (care au limita de absorbție aproape de domeniul vizibil) pentru temperaturi ridicate.

Tot datorită deplasării benzii de absorbție spre lungimi de undă mai mari, ca efect al creșterii temperaturii, majoritatea sorturilor de sticlă optică prezintă o accentuare a colorării (la început devin galbene, apoi portocalii și în final roșii).

Sticlele optice se caracterizează prin mai multe temperaturi semnificative:

- temperatura de curgere - temperatura la care sticla devine un fluid vâcos;
- temperatura de formare - temperatura la care tensiunile interne din sticlă se elimină în cca. 15 minute;
- temperatura de tragere - temperatura la care sticlei i se poate da forma dorită;
- temperatura de pătrundere - temperatura la care sticla pătrunde în porii unei plăci pe care se așează;
- temperatura de lucru - temperatura la care se prelucrează piesele optice.

Proprietățile termice ale sticlei sunt reprezentate în catalogul de sticlă optică [78], [83] prin coeficientul de dilatare termică liniară și conductivitatea termică.

1) Coeficientul de dilatare termică liniară

Coeficientul de dilatare termică liniară α reprezintă alungirea pe unitatea de lungime a unui eșantion de sticlă încălzit cu 1°C.

Coeficientul de dilatare este dependent de temperatură iar în *figura 4.3.* se prezintă această dependență. Pentru a calcula valorile dorite ale lui α , catalogul dă coeficienții de dilatare medii pentru două domenii de temperatură: de la +20 la -60°C și de la +20 la +120°C, precum și coeficienții $\alpha_{20/20}$ și m . Folosind coeficienții $\alpha_{20/20}$ și m și formula:

$$\alpha_{20/t} = \alpha_{20/20} + m (t - 20) \quad (4.16)$$

se poate determina valoarea medie a coeficientului de dilatare al sticlei în orice interval de temperatură între 20°C și 400°C, t fiind temperatura limită determinată pentru un interval dat, m fiind un factor de temperatură al valorii medii a coeficientului de dilatare ($\alpha_{20/t}$) iar $\alpha_{20/20}$ coeficientul de dilatare la 20°C.

Datele prezentate în specificațiile fiecărei clase trebuie luate ca aproximative.

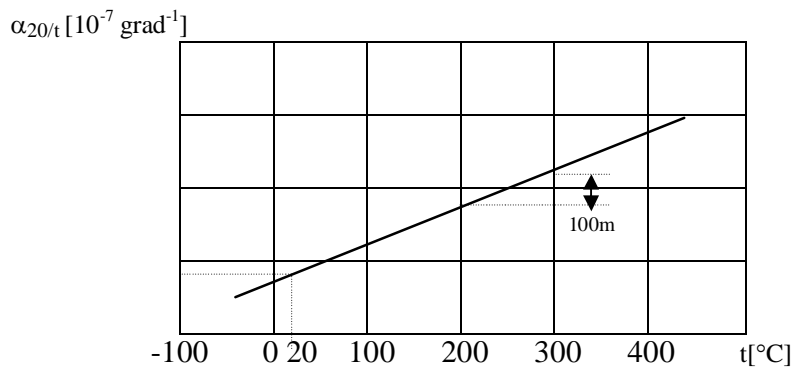


Figura 4.3. Dependența coeficientului de dilatare de temperatură

2) Conductivitatea termică

Conductivitatea termică λ_t reprezintă capacitatea sticlei de a conduce căldura. Se definește a fi cantitatea de căldură, în kcal sau J, care trece printr-o suprafață de 1 m² pe oră sau secundă, la un gradient care inițiază transferul de căldură egal cu 1°/m. Conductivitatea termică depinde de temperatură. Catalogul dă următoarele valori de referință ale conductivității termice pentru patru temperaturi: -50°C; 0°C; 20°C; 50°C.

Conductivitatea termică a diferitelor clase de sticlă a fost determinată cu ajutorul unui calorimetru fie în condițiile încălzirii monotone, fie comparând distribuția gradientului de temperatură de la un eșantion studiat cu cea a unui eșantion cu conductivitate termică cunoscută.

4.1.4.4. Proprietăți mecanice ale sticlei

Proprietățile mecanice ale claselor optice înscrise în catalog includ următorii parametrii: densitatea specifică, coeficientul de tensiune optică, modulul de elasticitate, modulul transversal, coeficientul lui Poisson.

a) Densitatea specifică

Densitatea specifică este definită ca masa sticlei pe unitate de volum. Valorile mesei specifice date în catalog corespund unei temperaturi de 20°C și unei presiuni atmosferice de 760 mm Hg.

- $\rho \in [2,27...6,79] \text{ g/cm}^3$, cele mai multe sorturi încadrându-se în domeniul $[2,5...4,2] \text{ g/cm}^3$.

Densitatea depinde de modul de preparare, un rol important revenind temperaturii de formare.

b) Modulul de elasticitate, modulul transversal și coeficientul lui Poisson

Proprietățile elastice ale sticlei sunt caracterizate în catalog de trei parametri:

E-modulul de elasticitate (modulul lui Young)

G-modulul transversal

μ -coeficientul lui Poisson

Constantele elastice sunt corelate între ele prin următoarea relație:

$$E = 2G(1 + \mu) \tag{4.17}$$

$$E \in [4,01...12,23] \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2 \tag{4.18}$$

Domeniul valorilor curente folosite este $E \in [5,4...8,335] \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$.

c) Coeficientul de tensiune optică

Coeficientul de tensiune optică B reprezintă relația dintre birefrința Δn și tensiunile (factorii externi sau tensiunile remanente) care îl cauzează:

$$\Delta n = \frac{\delta}{s} = B(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{4.19},$$

unde δ este diferența drumului optic, în mm, realizată atunci când lumina polarizată trece printr-o sticlă tensionată; B este coeficientul de tensiune optică; σ_1 și σ_2 sunt tensiunile normale principale, în kgf/cm^2 ; iar s este grosimea sortului de sticlă, în cm.

Coeficientul de tensiune optică, în $\frac{\text{mm}}{\text{cm}} / \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$, al sticlei optice este egal cu 1 dacă o tensiune de 1 kgf/cm^2 cauzează o birefrință de 1 mm/cm . Se determină prin măsurarea birefrinței într-un eșantion de sticlă supus la compresiune unidirecțională sau încovoiere.

Catalogul de sticlă optică include valorile approximate ale coeficienților de tensiune optică pentru λ egal cu 550 nm la 20°C, rotunjite cu 0,05.

d) Vâscozitatea

Este definită ca raportul dintre tensiunea de forfecare din sticlă în stare fluidă și gradientul de viteză normal pe direcția de deplasare a acesteia. În tabelul 4.5 sunt prezentate valorile vâscozității pentru câteva temperaturi semnificative:

Tabelul 4.5. Valori ale vâscozității pentru diferite temperaturi semnificative [78]

Temperatura caracteristică	Vâscozitatea [Poise]
Temperatura de înmuiere	$10^{7,6}$
Temperatura de formare	$10^{13,0}$
Temperatura de deformare	$10^{14,5}$

e) Rezistența la șocuri termice

Este dificil de exprimat cu ajutorul unor mărimi proprii întrucât influența compoziției și a modului de formare este ne semnificativă. Rezistența la șocurile termice este cu atât mai mare cu cât rezistența la rupere este mai ridicată și densitatea mai mică.

În catalogul de sticlă optică aceasta este caracterizată de indicele de refracție într-o regiune spectrală vastă, precum și de multe alte proprietăți fizice și fizico-chimice ce depind de compoziția chimică a sticlei.

Calitatea ridicată a sticlei este asigurată de toleranțe apropiate pentru parametrii nominali, constante optice de bază, absorbția luminii, omogenitatea optică, birefringența, striații și bule.

Sticla optică este omogenă, cu puritate mare și proprietăți optice, fizico-chimice, mecanice și termice deosebite. Omogenitatea sticlei (păstrarea constantă a indicelui de refracție în volumul sticlei) poate fi negativ afectată de prezența striurilor, bulelor, a tensiunilor interne și neomogenităților structurale. Defectele menționate influențează foarte mult prelucrarea cu radiație laser a sticlei optice.

Pentru a prelucra sticle optice cu radiație laser, din multitudinea de sticle existente, s-au ales în principal acelea care sunt stabile la radiații. Acest lucru semnifică faptul că sorturile respective de sticlă nu își modifică parametrii optici decât dacă lungimea de undă se modifică. Modificându-se parametrii optici se modifică indicele de

refracție, apare colorarea în zona de iradiere, ceea ce face ca în final sticla să nu mai poată fi utilizată.

Se prezintă în continuare câteva sorturi de sticlă optică stabile la radiații, alături de caracteristicile acestora (*tabelul 4.6*):

Tabelul 4.6. Sorturi de sticlă optică stabile la radiații [78], [83], [84],[85], [86]

Sort	Indice de refracție n_e [-]	Coef. de dispersie v_e [-]	Densitate specifică ρ [g/cm ³]	Coeficient de tensiune optică, B [nm·cm ⁻¹ /Kgf·cm ⁻²]	Modul de elasticitate E $\cdot 10^4 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Modul transversal G $\cdot 10^4 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Coef. lui Poisson μ [-]
F1	1,616870	36,69	3,57	2,90	5,56	2,27	0,221
SF5	1,666405	41,56	3,60	2,45	6,64	2,58	0,284
K8	1,518290	63,87	2,52	2,65	8,07	3,34	0,209
TF101	1,652188	33,62	3,86	2,50	5,36	2,18	0,227
BK7	1,518720	63,96	2,51	2,70	7,52	3,05	0,230

Față de literatura de specialitate care indică utilizarea laserilor de putere în undă continuă, se propune prelucrarea sticlelor din sorturile mai sus amintite cu fascicul laser în impulsuri, de puteri mai mici. În acest sens grosimea eșantionului va fi adecvată puterii laserului.

Pentru a prelucra în condiții bune aceste sorturi de sticlă se dorește încălzirea în vederea eliminării tensiunilor interne precum și modificarea parametrilor optici ai sticlei prin diferite tratamente (șlefuire, mătuire, mărirea rugozității suprafeței, acoperiri, adică modificarea absorbției și respectiv a transmitanței sticlei optice), pentru dozarea corespunzătoare a energiei în zona de prelucrare.

Comparativ spre exemplu, tăierea cu fascicul laser a sticlei de cuarț este simplă și se realizează ușor din următoarele motive:

- această sticlă nu este supusă influențelor de temperatură ce apar la acțiunea radiațiilor laser concentrate,
- acțiunea jetului laser conduce la vaporizarea SiO₂ la o temperatură apropiată de temperatura de topire a sticlei. De aceea, la efectuarea acestei operații practic nu apare o baie lichidă ci se observă numai o mică topire a muchiiilor tăieturii cu obținerea unei suprafețe polisate.

În condițiile unei focalizări corespunzătoare a radiației laser se vor putea prelucra eșantioane suficient de groase cu o precizie ridicată. Astfel, în cazul prelucrării sticlelor de cuarț nivelul puterii radiației laser nu joacă un rol atât de mare ca în cazul sticlei obișnuite. Așadar, tăierea de calitate a sticlei de cuarț se asigură prin puterea moderată a fasciculului laser, ceea ce face ca acest proces de prelucrare să aibă o răspândire largă, nefiind necesare instalații laser de putere. În concluzie, spre deosebire de tăierea sticlei de cuarț care se poate realiza cu succes folosind fascicule laser de ordinul 100 W și chiar mai puțin (la grosimi reduse de material), pentru tăierea sticlei obișnuite principalul trebuie să folosească fascicule laser de nivel de putere foarte mari, de ordinul a 10 kW.

4.1.5. Domenii de utilizare

Există multe sorturi de sticle optice motiv pentru care acestea se folosesc în diferite aplicații. Astfel se pot utiliza pentru confecționarea lentilelor de ochelari, a geamurilor de protecție, a cablurilor și fibrelor optice, în sistemele optice ale unor aparate de măsură și control (microscop optic, lunetă, lentile de focalizare), în sistemele optice ale laserilor, ale unor aparate spectrale, fotometrice, calorimetrice, fotografice.

Sticla optică mai este folosită și la realizarea lentilelor, prismelor, a lamelor sau plăcilor plan paralele și la diferite alte instrumente de măsură și control, camere fotografice și aparate de proiecție, sisteme automate și vizuale de recepție a luminii, aparate de transmisie și transformare a luminii.

Datorită caracteristicilor chimice, optice și mecanice specifice, sunt utilizate în aplicații militare și aerospațiale, în camerele de vedere ca ferestre sau pentru sistemele optice folosite în exterior sau în condiții dure de lucru.

4.2. Polimeri optici

Majoritatea polimerilor sunt fie complet amorfi fie au un component amorf și fiind cristalini. Astfel de materiale sunt sticlele dure și rigide aflate sub o temperatură clar definită cunoscută ca temperatura de tranziție a sticlei (T_v). La temperaturi peste T_v , la o rată de deformare cel puțin mică sau moderată, polimerul amorf este moale și flexibil și

chiar poate fi un elastomer sau un fluid foarte vâscos. Proprietățile mecanice ale polimerilor se schimbă drastic când temperatura depășește T_v . De exemplu, modulul de elasticitate se poate micșora cu un factor de 1000 de ori pe măsură ce temperatura crește peste T_v .

Se poate spune deci că polimerii pot fi amorfi sau semicristalini. Gradul de cristalinitate și morfologia materialelor cristaline au efecte profunde asupra comportamentului mecanic al polimerilor, și deoarece acești factori pot fi variați într-un domeniu foarte larg, proprietățile mecanice ale polimerilor cristalini vor fi diferite de la un polimer la altul. Polimerii cu cristalinitate ridicată ca polipropena, au o structură morfologică complexă.

Dependența tensiune-alungire pentru materialele de tip elastomer, materiale ductile și cele casante este prezentată în *figura 4.4*.

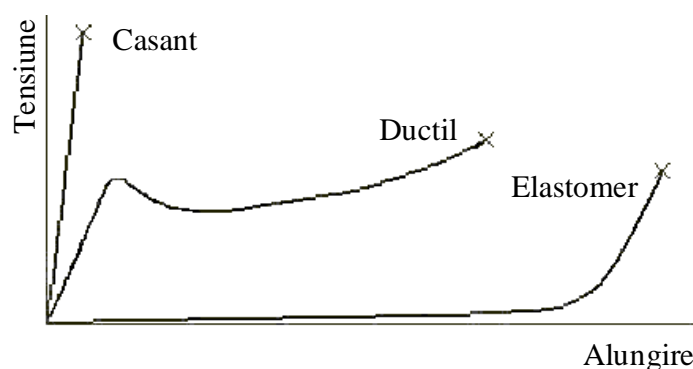


Figura 4.4. Dependența tensiune-alungire pentru diferite tipuri de materiale

Deoarece materialele utilizate în acest studiu sunt materiale cu structură amorfă se va pune accent mai mult pe acestea, detaliindu-se proprietățile chimice, fizice și mecanice ale polimerilor.

Polimerii (compuși macromoleculari) sunt formați din macromolecule alcătuite din unități structurale simple, mici (micromolecule), care se repetă periodic de-a lungul lanțului macromolecular.

După proveniență se disting trei clase de polimeri: naturali (proteine, albumine, polizaharide etc.), artificiali sau derivați (celuloza și derivații săi) și *sintetici* (obținuți prin polimerizare sau policondensare).

După forma geometrică (structural), polimerii se împart în: liniari, ramificați și reticulați sau tridimensionali. Polimerii liniari (sau filiformi) sunt caracterizați prin lanțuri (catene) macromoleculare dezvoltate pe o singură direcție (catene liniare). Polimerii ramificați posedă catene laterale iar la cei reticulați, moleculele formează o rețea spațială.

După comportarea la încălzire, polimerii se împart în termoplastici și termoreactivi sau termorigizi.

Polimerii *termoplastici* se modifică reversibil, înmuindu-se la încălzire și reîntărindu-se prin răcire. Posedă catene liniare sau *ramificate* și temperaturi de descompunere ridicate. Ei pot fi cristalini (polietilenă, poliamide etc.) sau *amorfi* (policlorură de vinil, *polimetacrilat de metil*, *policarbonat*, polistiren etc.).

Din punctul de vedere al structurii catenei sau al lanțului principal toți polimerii se împart în două clase mari:

- Polimeri homocatenari (compuși macromoleculari cu catene constituite din atomi identici, de exemplu din atomi de carbon – polimeri carbocatenari etc.). Atomii de carbon din lanțul principal pot fi legați cu hidrogen sau cu alți atomi sau grupe de atomi.
- Polimeri heterocatenari (compuși macromoleculari cu catene heterogene formate din atomi neidentici, de exemplu din carbon și oxigen, carbon și azot etc.) [66, 73].

Polimerii liniari pot fi trecuți în soluție, iar soluțiile lor, chiar în concentrații relativ mici posedă o vâscozitate mare, comparativ cu cei ramificați, la mase moleculare identice. De asemenea aceștia au elasticitate înaltă (datorită capacității macromoleculilor flexibile de a-și modifica forma sub influența forțelor exterioare) și rezistență mare la rupere (ca urmare a gradului înalt de orientare atins de macromoleculele liniare, cu o împachetare foarte compactă).

Polimerii ramificați pot fi trecuți, de asemenea, în soluție. Vâscozitatea acestor soluții este mai mică decât a soluțiilor realizate cu polimeri liniari deoarece este condiționată de gradul de simetrie mai redus al macromoleculilor. Rezistența mai mică la rupere se datorează structurii lor ramificate care împiedică împachetarea și orientarea macromoleculilor.

Proprietățile diferite ale polimerilor spațiali îi fac să se deosebească net de polimerii liniari și ramificați. Deoarece în polimerii spațiali predomină forțele chimice de legătură puternice dintre macromolecule, aceștia nu pot fi trecuți în soluție și nu se topesc fără descompunere [73].

Mecanismul mișcării termice într-un polimer are un caracter diferit de cel presupus în corpurile solide alcătuite din molecule mici, deoarece mișcarea concomitentă de vibrație și de translație a întregii macromolecule nu este posibilă. Energia termică necesară ar provoca, inițial, ruperea legăturilor chimice, apoi descompunerea (termică) totală a polimerului. Din această cauză polimerii nu se pot vaporiza. Întrucât la încălzirea polimerilor nu se observă o volatilizare vizibilă compușii macromoleculari nu pot fi trecuți în stare gazoasă. De aceea, pentru polimeri se cunosc numai două stări de agregare: solid și lichid [36], [73].

Pentru polimerii amorfi, cu grad mediu de polimerizare, se disting [73], [77], [80] patru stări fizice caracteristice: două solide (starea sticloasă sau vitroasă și starea înalt elastică sau superelastice) și două fluide (starea de fluid elastovâscos și starea vâscoasă). Deși delimitarea lor nu este netă, ele pot fi reprezentate schematic ca în *tabelul 4.7*.

Tabelul 4.7. Principalele stări de agregare ale polimerilor (compuși macromoleculari cu grad mediu de polimerizare)

Polimeri (compuși macromoleculari cu grad mediu de polimerizare)					
Stări solide			Stări fluide		Stare de degradare termică
Stare vitroasă (sticloasă)	Stare superelastică (înalt elastică)		Stare elastovâscoasă	Stare vâscoasă	
Comportare elastică $E=10^9-10^{10} \text{ N/m}^2$	Comportare de cauciuc $E \approx 10^6 \text{ N/m}^2$		Fluid vâscos care manifestă și proprietăți elastice (gel), (zonă difuză); polimeri cu grad înalt de polimerizare.	Lichid vâscos (topitură)	Substanță depolimerizată
Stare de tranziție cu comportare vâscoasă					
T_s	T_v	T_i	T_e	T_l	T_d

Sub temperatura de vitrifiere, T_v , atât oligomerii cât și polimerii se găsesc în starea vitroasă (sticloasă). La oligomeri, T_v delimitează trecerea din starea sticloasă în starea fluid-vâscoasă. Însă, după o anumită masă moleculară (corespunzătoare trecerii de la oligomer la polimer), T_v marchează trecerea din starea sticloasă în starea superelastică

(înalt elastică sau de cauciuc), tranziție caracteristică polimerilor obișnuiți, cu masă moleculară medie 10^4 - 10^5 (figura 4.5).

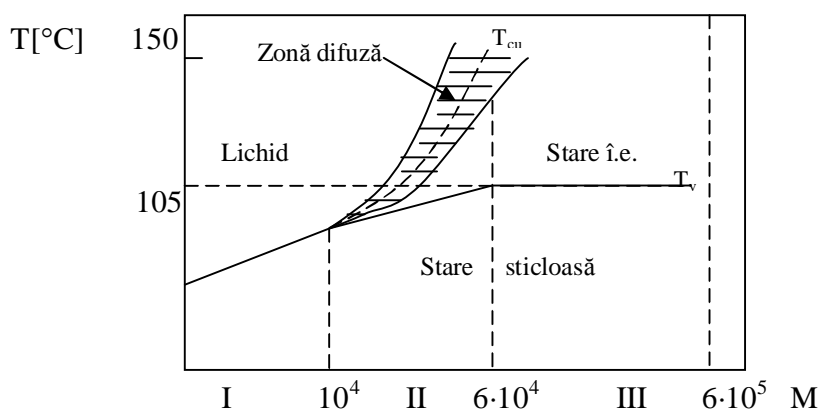


Figura 4.5. Dependența stărilor fizice de temperatură și de masa moleculară pentru polimerii amorfi (I – oligomeri, II – polimeri, III – polimeri înalt elastici)

Intervalul de temperatură în care polimerul posedă proprietăți superelastice crește odată cu masa moleculară. În mod analog, zona difuză, care separă starea superelastică de cea fluid-vâscoasă, devine tot mai largă cu cât masa moleculară a polimerului este mai mare, dar nu depășește o anumită valoare. Într-adevăr, polimerilor înalt elastici ($M \geq 6 \cdot 10^5$) nu le este caracteristică această tranziție deoarece se degradează termic fără a mai trece prin starea fluid vâscoasă.

Mijlocul zonei de tranziție difuză – numit temperatura de curgere T_{cu} , determină limita superioară de utilizare a unui polimer care în condiții obișnuite de temperatură se află în stare superelastică și limita inferioară a unui polimer care în aceleași condiții de temperatură se află în starea de fluid vâscos. În mod asemănător, T_v marchează limita superioară de utilizare a unui polimer termoplast (amorf) și limita inferioară de utilizare a unui elastomer (cauciuc) amorf.

Polimerii termoplastici ca polistirenul (PS), polimetacrilatul de metil (PMMA), policlorura de vinil (PVC) etc., care la temperatura obișnuită se află în stare sticloasă ($T < T_v$), pot fi prelucrați prin injecție și extrudare numai la temperaturi mai mari decât T_{cu} .

În cele ce urmează se vor trata proprietățile și caracteristicile principale a două materiale polimerice amorfe parțial transparente (cunoscute și sub denumirea de sticle

organice) care au proprietăți optice asemănătoare și uneori chiar superioare sticlelor optice și anume: policarbonatul și polimetil metacrilatul.

4.2.1 Policarbonatul

Policarbonatul (PC) este unul din polimerii care a beneficiat de un ciclu inventare-producție extrem de redus, fiind industrializat în 1959 imediat după sintetizarea sa în 1956 de către Schnell [73, 80]. Are următoarele denumiri comerciale sau industriale: DIFLON – Rusia, LEXAN – S.U.A., MAKROLON – Germania etc.

Policarbonații fac parte din categoria rășinilor cu proprietăți plastice, provenite din policondensarea bisfenolului A cu fosgen. În figura 4.6 se prezintă structura chimică a PC. Acest material posedă în structura sa două grupări fenil și două grupări metil care contribuie la rigiditatea moleculară a policarbonatului, având un efect larg asupra proprietăților acestuia. Atracția dintre cele două grupări fenil și dintre diferite molecule duce la lipsa mobilității moleculei individuale. Toate acestea fac ca în final să rezulte o bună rezistență termică dar o vâscozitate relativ ridicată a acestui material în timpul prelucrării. Inflexibilitatea și lipsa mobilității permite policarbonatului să nu se dezvolte într-o rețea cu structură cristalină, obținându-se o transparență ridicată a acestui polimer în lumina vizibilă [88].

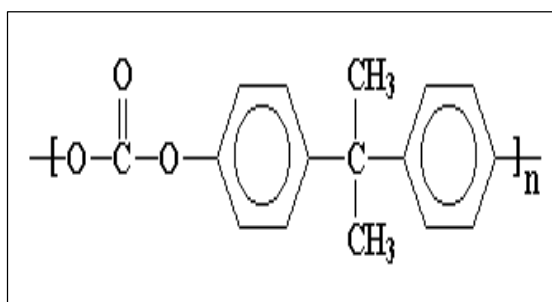


Figura 4.6. Formula chimică a policarbonatului

PC este un material termoplast transparent, inodor, insipid, cu densitatea de aproximativ 1,2 g/cm³. Din cauza numeroaselor grupări polare se caracterizează printr-o serie de proprietăți remarcabile [80, 81]:

- rezistență la tracțiune și la șoc,

- o mare duritate și rigiditate, dublate de o tenacitate și elasticitate surprinzătoare,
- termostabilitate foarte bună în timp,
- proprietăți mecanice și electrice puțin influențate de temperatură în intervalul de exploatare cuprins între -100°C și $+135^{\circ}\text{C}$,
- rezistență la acizi, săruri și produse petrolifere,
- o bună rezistență la intemperii chiar în condiții climatice defavorabile.

4.2.1.1. Proprietăți fizice

Policarbonatul este un polimer amorf cu o excelentă transparență în spectrul vizibil. La grosimi mari prezintă o ușoară tentă de galben. Greutatea moleculară a acestuia este relativ mare având valori cuprinse între 20 – 50 000.

4.2.1.2. Proprietăți mecanice

Deoarece policarbonatul prezintă o temperatură de tranziție vitroasă de 150°C utilizarea lui se va face exclusiv în domeniul sticlos (de rigiditate mare). Proprietățile mecanice ale acestui material sunt deosebite de cele ale altor polimeri și anume:

- un comportament cvasielastice până la rupură;
- dacă policarbonatul conține în structura sa și 30% fibră de sticlă, rezistența la șoc se reduce iar proprietățile la sollicitări de tracțiune sunt net ameliorate (figura 4.7);

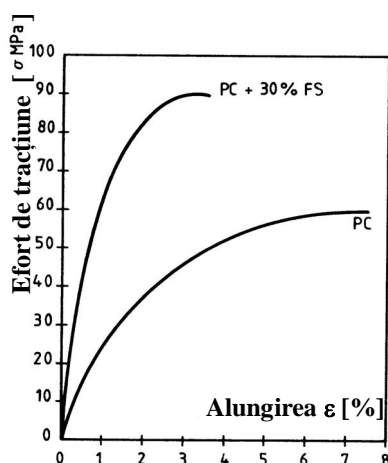


Figura 4.7. Comportarea la sollicitări de tracțiune a policarbonatului [77]

- un modul ridicat ($>2\ 300\ \text{N/mm}^2$);
- rezistență excelentă la șoc chiar și la frig (până la $-100\ ^\circ\text{C}$) – figura 4.8;
- o plajă largă de utilizare a acestui polimer în aplicații cu temperaturi până la $135\ ^\circ\text{C}$.

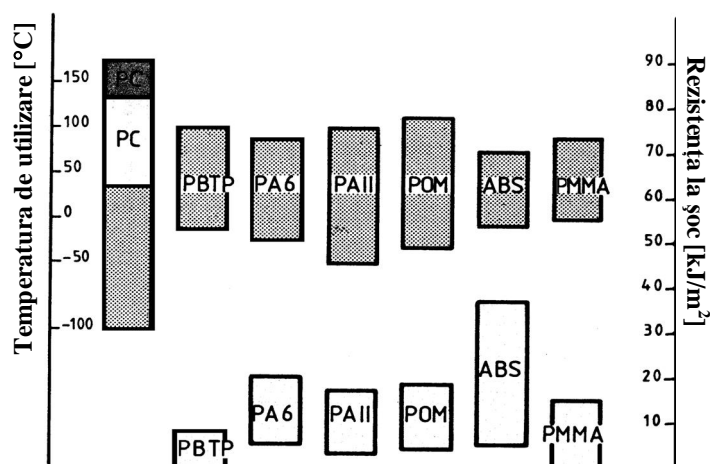


Figura 4.8. Rezistența la șoc și la temperaturi de prelucrare a diferiților polimeri [77]

4.2.1.3. Proprietăți chimice

Cantitatea de apă absorbită de acest material este $< 0,2\%$ motiv pentru care proprietățile mecanice nu sunt afectate. Astfel policarbonatul poate fi utilizat la fabricarea obiectelor care se sterilizează sau se spală frecvent în apă caldă cu specificația că un contact pe timp lung cu apă ce are temperaturi peste $60\ ^\circ\text{C}$ produce descompunerea polimerului și implicit scăderea rezistenței la șoc a materialului.

În ceea ce privește plăcile subțiri de policarbonat, acestea prezintă o permeabilitate clară la gaze ca: hidrogen, He, gaz carbonic, anhidride sulfuroase, etc.

Policarbonatul nu este atacat de acizii minerali și organici diluați dar e atacat de bazele puternice precum amoniacul și pare a fi destul de stabil în prezența ozonului.

În funcție de amunite produse chimice el este:

- insolubil în hidrocarburi alifaticе, eteri și alcooli;
- parțial solubil în hidrocarburi aromatice;
- solubil în hidrocarburi halogenate.

Fiind un material netoxic este folosit cu succes în industria alimentară.

4.2.1.4. Proprietăți termice și electrice

Policarbonatul se poate utiliza într-un domeniu vast de temperatură de la $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ la $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$ (fuziunea realizându-se la $240\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$), fiind un excelent izolan termic printre materialele transparente. Deoarece este un material amorf nu se deformează foarte ușor și are rezistență mare la foc, auto-stingându-se.

De asemenea, e un bun izolator electric fiind foarte puțin afectat de variațiile de temperatură sau umiditate.

4.2.1.5. Proprietăți optice

Aceste proprietăți sunt cele mai importante pentru procesul de prelucrare ce urmează a fi studiat în următoarele capitole. Totodată se va înțelege mai bine de ce s-au preferat aceste două tipuri de polimeri pentru prelucrarea cu laser și apropierea proprietăților acestor materiale de cele ale sticlelor optice alese inițial pentru acest studiu.

Astfel transparența policarbonatului este superioară celei a sticlei, coeficientul de transmitere al luminii vizibile fiind de 88%. Indicele de refracție are valoarea $n=1,491$ iar coeficientul lui Abbe este $v=57,2$.

Policarbonatul este de două ori mai ușor ca sticla, e incasabil, are o rezistență buna la radiații UV și nu se îngălbenește.

În *tabelul 4.8* sunt date câteva valori legate de proprietățile celor două materiale considerate pentru studiu: policarbonat (PC) și polimetil metacrilat (PMMA).

Tabelul 4.8. Proprietățile celor două materiale termoplastice [63], [81]

	Densitate [g/cm ³]	Indice de refracție [-]	Coef. Abbe [-]	Transmisia luminii [%]	Coeficient de dilatare liniară α [1/°C]	T _v [°C]
PC	1.18	1.491	57.2	88	7.0×10^{-5}	150
PMMA	1.20	1.583	34.5	92	6.5×10^{-5}	105

4.2.1.6. Domenii de utilizare

Acest material se aplică în domenii foarte variate [77] având o largă utilizare în:

- electromecanică (cadrane telefonice, prize)
- aparate electrocasnice (filtre de cafea, uscătoare de păr, răzătoare, mixer, veselă)
- aparate optice (binoclu, aparate foto)

- utilaje (capotă, semnal luminos, grile)
- materiale de protecție transparente sau nu (cască, vizieră, parbriz, scut, manta de protecție)
- iluminat (far automobile, iluminare casnică)
- sticlă securizantă
- materiale medicale sterile (biberoane, seringi)

4.2.2 Polimetilmetacrilatul

Polimetilmetacrilatul (PMMA) sau polimetacrilatul de metil (cu următoarele denumiri comerciale sau industriale: sticlă organică, stiplex, plexiglas – România, PLASTIGLAS – Italia, ROHOGLAS – Germania, PERSPEX – Anglia, OROGLASS – S.U.A. etc.) se obține prin polimerizarea în bloc (adică în fază condensată, în absența dizolventului, în urma căreia se formează o masă solidă, monolitică, de polimer-bloc având forma vasului în care s-a efectuat reacția) a metacrilatului de metil în prezența inițiatorilor. Are următoarea structură chimică:

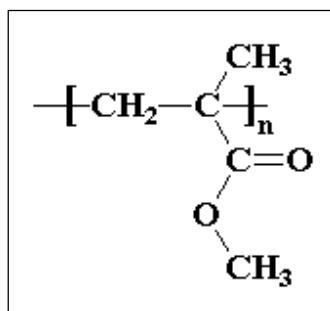


Figura 4.9. Formula chimică a polimetilmetacrilatului

A fost inventat de Röhn în 1927 care-l brevetează [77] sub denumirea de “plexiglas”. Intră în producție industrială după trei ani, în 1930. Moholy-Nagy și Pevsner au produs din PMMA primele sculpturi din materiale plastice. Este vorba despre un material rigid, transparent, incolor, cu densitate de 1,17-1,20 g/cm³, dotat cu o capacitate excepțională de transmitere a luminii, superioară celei a sticlei. Temperatura sa de vitrifiere este cuprinsă între 94°C și 105°C. Se livrează în plăci care se prelucrează foarte ușor.

Polimerizarea metacrilatului de metil (monomerului) se poate face pe două căi:

- 1) polimerizare în emulsie – reacția este catalizată pe peroxizi deoarece monomerul este în emulsie în apă. Se obține o pudră albă de greutate moleculară mică, pregătită pentru mulare.
- 2) polimerizare în topitură – între două plăci de sticlă se introduce monomerul cu catalizator în etuvă. Se obțin plăci (2m x 3m) de 1mm până la 200 mm grosime, cu o calitate excelentă a suprafeței (ca de sticlă), fără orientare (izotropă) și de calitate optică perfectă. Este un caz rar de a obține obiecte termoplastice direct prin polimerizare. Greutatea moleculară mai ridicată ca cea în emulsie, facilitează termoformarea prin creșterea plajei de temperatură a platoului cauciucat.

4.2.2.1. Proprietăți fizice și optice

PMMA este cunoscut pentru proprietățile optice excepționale. Acest polimer amorf este de o transparență remarcabilă (92% transmisie luminoasă), în vizibil la 0,380 μm - 0,780 μm . Absorbția luminii nu atinge decât 50% pentru o grosime a materialului de 3m.

Unghiul reflexiei totale pe o suprafață interioară este de 41° la 42° (ceea ce permite realizarea din acest material a “conductorilor” de lumină, fibre optice etc.).

Indicele de refracție al PMMA (pentru $\lambda=0,5876 \mu\text{m}$ - He) este de 1,491, ceea ce arată că este un material adaptat fabricării pieselor optice.

Plăcile extrudate și deci neizotrope prezintă un indice de refracție diferit datorat orientării materiei și a unei calități optice mai puțin bune decât cea a plăcilor polimerizate în topitură.

4.2.2.2. Proprietăți mecanice

PMMA-ul este un polimer amorf care are o temperatură de tranziție vitroasă cuprinsă între 105-135 °C, în funcție de produs, ceea ce înseamnă că la temperatura ambiantă acesta este dur și rigid. Acest material este higroscopic motiv pentru care în condiții extreme apa absorbită se va comporta ca un plastifiant și va modifica proprietățile mecanice ale polimerului.

La tensiuni critice PMMA-ul crapă, acest fenomen fiind accentuat în prezența compușilor agresivi (de tip alcool).

În ceea ce privește rezistența la șoc, aceasta este relativ scăzută (*figura 4.8*) iar polimerul în aceste condiții devine casabil.

Din punctul de vedere al durității acest material se zgârie foarte ușor, în timp calitatea suprafeței putând fi alterată, dar are totuși avantajul unei lustruiri relativ ușoare.

4.2.2.3. Proprietăți chimice

PMMA-ul este insipid și inodor, fiind recunoscut pentru calitățile sale în industria alimentară unde e utilizat pe scară largă. Prezintă de asemenea o bună rezistență la îmbătrânire la lumină.

Până la temperaturi de 60 °C, PMMA rezistă destul de bine la acțiunea acizilor organici și minerali diluați (slabi) precum și a soluțiilor alcaline diluate dar este atacat de următorii produși (*tabelul 4.9*):

Tabelul 4.9. Câțiva agenți agresivi pentru PMMA

Agenți agresivi pentru PMMA		
Acetonă	Cloroform	Metanol 30%
Alcool, alcool etilic	Ciclohexan	Nitrobenzen
Amoniac lichid	Apa oxigenată	Petrol
Benzen	Esență de terebentină	Fenol
Carburant de avion	Hidrocarburi	Tetraclorură de carbon
Clor lichid		Tricloretilenă

4.2.2.4. Proprietăți termice și electrice

PMMA este combustibil și arde lent fără a degaja fum în exces. Ca și în cazul altor polimeri amorfi, contracția la turnare este mică (0.4 – 0.7 %).

Având un coeficient de dilatație liniară atât de diferit de cel al metalelor și o elasticitate scăzută nu sunt recomandate inserțiile metalice la piesele din PMMA injectate.

Temperatura maximă de utilizare este scăzută, situându-se sub 80°C (*figura 4.8*).

Proprietățile electrice sunt afectate de umiditate. Rezistența sa la arc este excelentă. Un aspect negativ îl constituie faptul că PMMA este un material electrostatic,

favorizând acumularea prafului pe suprafață. Acest inconvenient poate fi remediat utilizând produși antistatici ce migrează spre suprafață formând un strat conducător.

4.2.2.5. Domenii de utilizare

Caracteristicile optice stau la baza principalelor aplicații ale PMMA-ului și anume:

- construcții (vitrine, parapete, balustrade, panouri ușoare)
- industria de mobilă (mobili modern)
- industria constructoare de mașini (faruri de semnalizare spate, faruri ochi de pisică)
- artă nautică
- aparate electrocasnice
- aparate de laborator
- comunicații (fibre optice)
- aparate electronice de uz general (lentile pentru aparate foto, cadrane telefonice)
- iluminare

4.3. Concluzii

Pentru prelucrările ce urmează a fi efectuate se vor utiliza următoarele categorii de materiale:

- sticle optice: BK7, SF5, TF101 – sticle alese astfel încât să fie rezistente la radiații gama – deci să nu își modifice caracteristicile optice la diferite iradiări;
- polimeri optici: PC și PMMA – care sunt denumiți și sticle organice pentru proprietățile lor optice asemănătoare sau chiar mai bune decât ale sticlelor.

În urma studierii fiecărui material în parte rezultă că proprietățile optice și cele termice vor juca un rol determinant în prelucrările cu laser, motiv pentru care temperatura de tranziție vitrosă, indicii refracție al materialelor și transmitanța în funcție de lungimea de undă, par a fi parametrii cei mai importanți în acest proces.

5. EFECTE INDUSE DE IMPACTUL CU RADIAȚIILE LASER ÎN CORPURI PARȚIAL TRANSPARENTE

5.1. Introducere

În general se poate arăta că laserul poate fi folosit practic la prelucrarea oricărui tip de material. Astfel cu ajutorul radiației laser putem realiza o gama largă de operații de la prelucrări dimensionale până la vaporizarea materialului din zona de lucru.

Aplicarea fasciculului laser la efectuarea diverselor prelucrări se poate face datorită faptului că oferă posibilități de introducere în procesul de fabricație a unor tehnologii noi, care asigură îmbunătățiri atât calitative cât și economice. În afară de aceasta, radiația laser se poate utiliza la efectuarea unor operații care nu se pot realiza prin alte procedee [10], [11], [12], [29], [53].

De cele mai multe ori nu avem posibilitatea de a alege instalația laser în funcție de material ci mai degrabă aceasta ne stă la dispoziție și în funcție de ea se stabilesc parametrii necesari care să permită prelucrarea materialului. Pentru aceasta este necesară precizarea parametrilor generali ai instalației laser care permit prelucrarea materialului studiat urmând să se stabilească parametrii optimi regimului de lucru.

După ce se realizează o compatibilitate între instalația laser și materialul de prelucrat, se stabilesc condițiile optime ale prelucrării cunoscând toți parametrii care intervin în proces. Apoi se stabilesc și condițiile de cuplare ale radiației și se studiază interacțiunea acesteia cu substanța. În acest sens vor fi importante efectele de interes tehnologic induse de radiația laser în corpurile parțial transparente studiate.

Când toate acestea sunt stabilite se poate face modelarea matematică a procesului iar după prelucrarea propriu-zisă să se observe influențele impactului radiației laser – material de prelucrat în zona influențată termic (ZIT).

Ținând seama de aceste considerente și de ceea ce își propune această teză să soluționeze, am ales patru tipuri diferite de materiale optice transparente în spectrul vizibil. Două grupe sunt din categoria sticlelor optice iar celelalte două din categoria polimerilor optici. Au fost folosite patru instalații diferite dar nu pentru fiecare material în parte, în funcție de procesul de prelucrare aplicat. Astfel pentru sticlele optice s-a urmărit

procedeul de găurire cu fascicul laser cu CO₂ (două instalații cu parametri diferiți) și Nd-sticlă, iar pentru polimeri s-a făcut marcarea cu un laser Nd-YAG.

5.2. Studiul interacțiunii radiației laser – sticlă optică/polimeri optici

Orice acțiune de prelucrare cu fascicule laser reprezintă, în esență, un transfer controlat de energie, condiționat și mijlocit de incidența și respectiv absorbția fasciculului laser pe suprafața de prelucrat (*figura 5.1*).

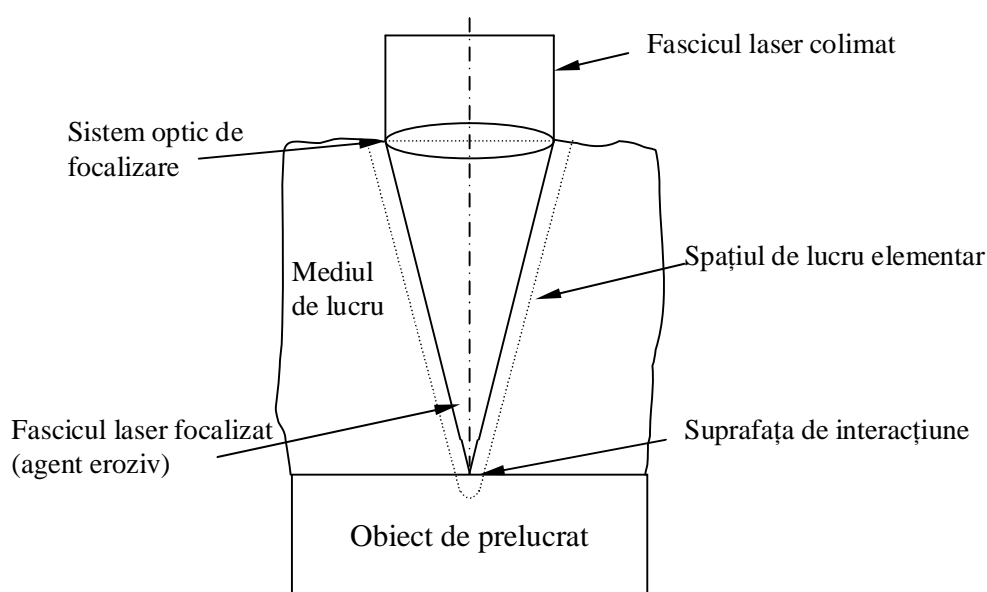


Figura 5.1. Schema de principiu a prelucrării prin eroziune cu fascicule laser – [54]

În condițiile de mai sus, fasciculele laser acționează ca agenți erozivi de tip jet, capabili să genereze suprafețe tehnologice.

Schema bloc a principalelor fenomene de interacțiune radiație laser intensă-substanță, finalizate prin eroziune, este prezentată în *figura 5.2* [14], [54].

La interacțiunea unui fascicul laser cu o materie oarecare se produc fenomene care sunt determinate de proprietățile optice ale materiei în care se produce propagarea. Aceste fenomene apar la materialele care au de fapt proprietăți optice neliniare și se întâlnesc mai ales la materialele solide. Uneori se întâlnește denumirea de optică neliniară, în realitate este vorba de proprietățile optice neliniare ale unor materiale.

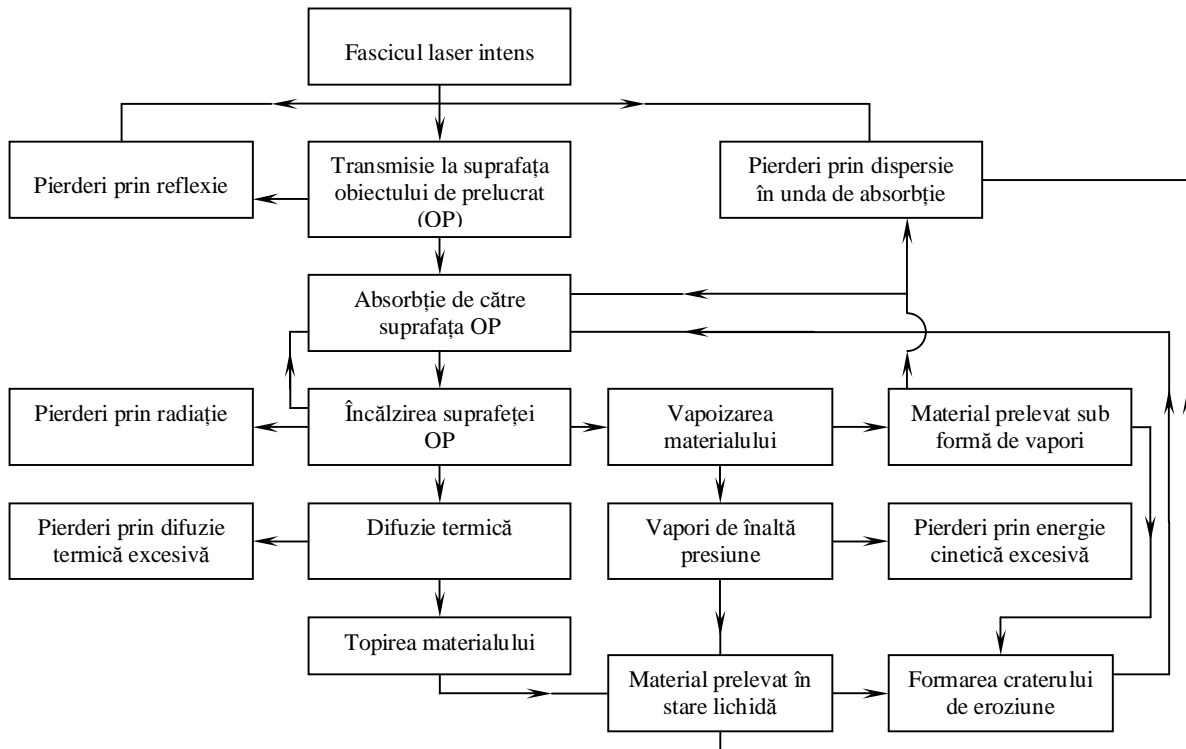


Figura 5.2. Schema bloc a fenomenelor de interacțiune radiație laser-material de prelucrat

La trecerea fasciculului laser prin corpuri cu proprietăți optice neliniare se mai pot produce fenomene de autofocalizare, formare de plasmă, difuzii de tipul Raman, Brillouin, Rayleigh ș.a.

Dirijarea unui fascicul laser asupra unui material, prin absorbția luminii, va provoca o modificare a stării termice a materialului. Producerea fenomenului se poate explica în modul următor. La incidența fasciculului laser cu materialul, datorită interacțiunii dintre câmpul radiant și atomii substanței, în cadrul ciocnirilor care se produc între fotoni și electroni, energia luminoasă se transformă în energie calorică, care se va transmite de către electroni în rețea, modificând în acest fel starea termică a materialului. Se poate menționa că energia optică se transformă instantaneu în energie calorică. Viteza de difuzie a căldurii în material va fi cu atât mai mare cu cât conductibilitatea termică a materialului e mai mare [39].

Modificările stării termice a materialului vor fi determinate de densitatea de energie absorbită pe unitatea de suprafață. Dacă densitatea este mică, astfel că nu atinge

limita caracteristică schimbării de fază (topire), se va produce numai o încălzire a materialului.

Este de reținut că în procesul de transformare a stării termice a materialului asupra căruia acționează fasciculul laser, trebuie să se țină seama de factorii care pot influența acest proces. Între aceștia se amintesc: caracteristicile termofizice și optice ale materialului, parametrii energetici ai fasciculului laser și poziția focarului lentilei în raport cu suprafața piesei.

Fasciculul laser fiind coerent, se poate focaliza puternic astfel că se pot obține temperaturi care să producă evaporarea oricărui material asupra căruia acționează [68], [76].

Procesul de prelucrare se inițiază, în condițiile date, prin încălzirea extrem de rapidă și vaporizarea localizată a materialului supus iradierii. Ca urmare, absorbția fasciculului laser se intensifică, crește adâncimea craterului format și temperatura pereților acestuia. O amplificare corespunzătoare a difuziei termice conduce la formarea unui strat de material lichid. Acțiunea cumulată a presiunii radiației și a undei de șoc dezvoltate în coloana de plasmă formată deasupra suprafeței afectate, determină expulzarea materialului lichid după direcții paralele cu pereții craterului de eroziune. O reprezentare schematică, la modul general, a proceselor de eroziune cu fascicule laser este indicată în *figura 5.3* [54].

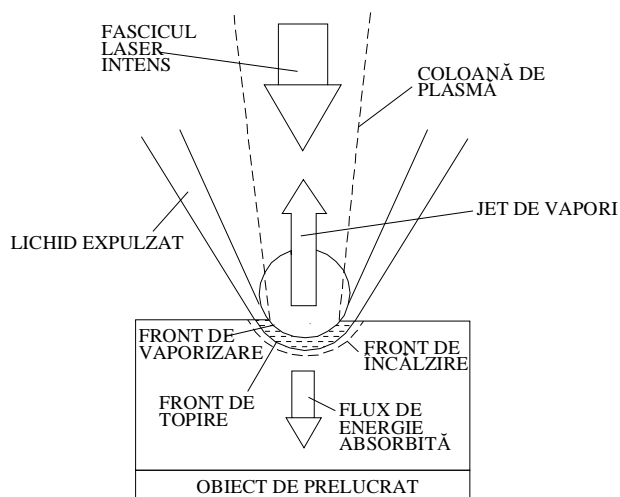


Figura 5.3. Schema generală a prelevării de material la prelucrarea cu fascicule laser

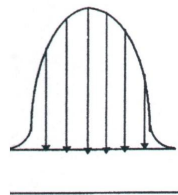
Spre deosebire de materialele opace, în particular metale, la care adâncimea de penetrare a radiației laser este limitată de efectul pelicular la valori de ordinul 5-10 nm, iar încălzirea prin conversia energiei radiației are un caracter de suprafață, în cazul materialelor parțial transparente și transparente (inclusiv sticle optice respectiv polimeri), o parte însemnată a energiei este transmisă prin masa corpului iradiat iar încălzirea datorată energiei absorbite are un pronunțat caracter volumic. Restul radiației laser este reflectată în exterior.

Prelucrarea materialelor optice cu fascicul laser poate fi împărțită în două etape:

- încălzirea piesei
- prelucrarea propriu-zisă (tăiere/găurire)

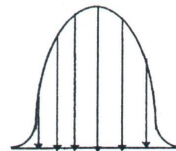
În faza de încălzire, temperatura suprafeței de prelucrat crește până la o anumită valoare datorită interacțiunii cu fasciculul laser. Faza de încălzire este de durată foarte scurtă deoarece intensitatea fasciculului laser este foarte mare. În timpul fazei de încălzire suprafața de prelucrat nu este erodată și nu se produce prelucrarea pentru că nu apare tranziția de fază. După ce temperatura suprafeței atinge punctul de topire care pentru sticle optice este $T_t = 500 - 600^\circ\text{C}$, apare prelucrarea (figura 5.4).

Radiație laser



$T_p < T_t$

Faza de încălzire



$T_p = T_t$

Faza de prelucrare

T_p - temperatura suprafeței de prelucrat

T_t - temperatura de topire

Figura 5.4. Etape principale la prelucrarea cu radiație laser

În timpul procesului de prelucrare, temperatura dezvoltată în interiorul materialului de prelucrat este extrem de înaltă. Temperatura de vaporizare a sticlelor optice este notată T_v , dar uneori în timpul procesului de prelucrare se pot atinge temperaturi și mai înalte decât această temperatură.

Datorită acestei temperaturi înalte dezvoltate la prelucrarea cu fascicul laser a materialelor optice și datorită presiunilor mari care apar la impactul cu radiația laser, materialul topit este expulzat violent din cavitatea prelucrată.

Conform [54], procesele de prelucrare prin eroziune cu fascicule laser (debitare, găurire, marcarea, gravare etc.) sunt plasate între pragul de vaporizare al substanței și pragul de dezvoltare al unde de absorbție a radiației incidente în coloana de plasmă din spațiul de lucru.

Ca o concluzie a celor studiate în acest subcapitol vom face referire strictă la cele două operații de prelucrare cu fascicul laser care prezintă interes pentru materialele studiate (sticle optice, polimeri) și anume: găurire și marcarea.

Astfel la găurire procesele de interacțiune fascicul laser – material prelucrat păstrează caracteristicile generale analizate anterior, prelevarea de material realizându-se în acest caz predominant prin vaporizare și numai parțial prin topire (datorită fenomenelor de conducție termică). Expulzarea materialului topit sub acțiunea presiunii vaporilor formați este incompletă, ceea ce afectează negativ productivitatea și precizia alezajelor obținute. Faptul se explică prin scăderea intensității radiației odată cu creșterea adâncimii alezajului creat, datorită defocalizării fasciculului și prin absorbția energiei radiației de către podusele erodate, în curs de expulzare. Prin aceasta se micșorează viteza locală de vaporizare și implicit presiunea vaporilor formați, necesare pentru evacuarea materialului lichid.

Cantitatea de material lichid formată și neevacuată trebuie să fie minimă, motiv pentru care se impune stabilirea judicioasă a valorilor de prag ale intensității radiației.

Găurirea se poate realiza în regim monopuls, sub acțiunea unui impuls laser sau în regim multipuls, sub acțiunea unui tren de impulsuri succesive. În cazul perforării (aplicată sticlelor optice) se obțin de regulă alezaje de secțiune circulară, cu suprafețe laterale mai mult sau mai puțin conice și rugoase. Forma și dimensiunile alezajelor executate depind de energia, durata și alura impulsului laser, de dimensiunile petei focale

și distribuția intensității radiației (densității de energie), de poziția suprafeței de prelucrat în raport cu planul focal, de numărul și frecvența impulsului laser.

Marcarea cu fascicule laser a suprafeței produselor finite este o aplicație conexă a gravării, dezvoltată la nivel industrial și bazată pe fenomenul de vaporizare localizată a substanței sub acțiunea radiației laser [20], [30], [41]. Marcarea este posibilă sub acțiunea:

- unui tren de impulsuri caz în care simbolul de marcarea este constituit dintr-o mulțime de puncte sau fragmente de linii, generate prin acțiunea individuală a impulsurilor aplicate (procedeu aplicat polimerilor);
- unui singur impuls de putere mare și durată redusă (Q-switch) pentru întregul marcaj, independent de complexitatea geometrică a acestuia.

Această prelucrare este aplicată produselor metalice și nemetalice, caracterizate prin dimensiuni foarte mici, din materiale extrem de fragile, sensibile la tensiuni interne reziduale sau la acțiunea agenților chimici cum ar fi: dispozitive semiconductoare, substraturi ceramice, bare de combustibil nuclear, plăcuțe din carburi metalice, instrumente pentru măsurări mecanice, piese miniaturale din materiale organice etc.

5.3. Stabilirea condițiilor optime la prelucrarea cu laser a unor sorturi de sticle optice/polimeri optici

Datorită faptului că prelucrările efectuate pe astfel de materiale au fost prea puțin studiate, condițiile optime la prelucrarea cu radiație laser a acestora vor fi stabilite la modul general, după care, în urma unor încercări realizate pe materialele alese pentru studiu, se pot selecta doar factorii de influență importanți pentru proces [27], [28], [33].

Astfel parametrii esențiali pentru prelucrarea acestor materiale sunt cei legați de instalația laser în strânsă corelație cu caracteristicile materialului ales. În acest sens, parametrii instalației laser considerați importanți sunt:

- lungimea de undă λ [μm] – care trebuie să fie compatibilă cu parametrii optici ai materialului prelucrat;
- puterea la ieșire P_L [W] – este proporțională cu numărul fotonilor emiși în unitatea de timp de către sursa laser [24] și care trebuie să fie suficient de mare încât să permită prelucrarea materialelor în studiu;

- intensitatea $I [W/cm^2]$ sau densitatea de energie $E [J/cm^2]$ – pentru laserii în impuls;
- regimul de funcționare al oscilatorului laser – pentru instalațiile laser care pot lucra atât în regim continuu (cw) cât și pulsant (pw). De regulă laserii cu solid operează mai bine în pw iar cei cu mediu gazos, în cw . Alegerea modului de operare este funcție de tipul aplicației la care se va utiliza laserul [14].
- structura modală TEM_{mn} a radiației – care semnifică distribuția transversală a câmpului electromagnetic, m și n reprezentând numărul de noduri în direcții ortogonale pe cea de propagare a fasciculului laser [14]. Aceasta se recomandă să fie cât mai aproape de modul gaussian TEM_{00} ;
- modul de focalizare al fasciculului laser față de poziția piesei de prelucrat – se referă la deplasarea planului de focalizare în obiectul de prelucrat, acesta putând fi situat pe suprafața piesei, în interiorul sau la partea inferioară a acesteia;
- frecvența de repetiție a impulsurilor $F [Hz]$;
- tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj $U [V]$;
- viteza de prelucrare $v [m/s]$ - pentru situații în care prelucrarea se face după un contur rectiliniu sau curb;
- presiunea gazului de lucru $p [Pa]$ - necesară pentru a îndepărta materialul topit din zona de lucru;
- debitul gazului de lucru $q [l/min]$.

Din punctul de vedere al materialului, parametrii importanți sunt:

- grosimea materialului $g [mm]$ - care poate fi variabilă, alegându-se 3-4 grosimi pentru fiecare sort;
- indicele de refracție al materialului $n [-]$ – care trebuie să fie compatibil cu radiația laser utilizată pentru a permite procesarea materialului;
- calitatea suprafeței materialului studiat – prin acoperiri cu straturi reflex sau antireflex sau prin modificarea rugozității stratului de suprafață;
- tipul materialului optic prelucrat;
- transmitanța sau absorbivitatea materialului;
- temperatura de tranziție vitroasă a materialelor optice, etc.

În privința alegerii instalației laser se va acorda atenție formei emisiei radiației laser, care poate fi în impulsuri sau continuă, precum și puterii necesare pentru efectuarea operațiilor dorite. Pentru alegerea puterii se recomandă o instalație ușor supradimensionată față de puterea necesară, ceea ce va crea condiții pentru realizarea unor prelucrări mai economicoase. Deși instalația va costa ceva mai mult, nefiind utilizată la puterea de vârf, consumul de energie va fi mai mic.

Pentru folosirea fasciculului laser în condiții de eficiență tehnică și economică, la efectuarea unor operații de prelucrare a materialelor, se recomandă a se analiza următoarele aspecte:

- coeficientul de absorbție al suprafeței de prelucrat în funcție de lungimea de undă a radiației;
- gradul de reflectabilitate al suprafeței în funcție de lungimea de undă a radiației;
- coeficientul de difuzie termică al materialului supus prelucrării;
- efectele termice asupra materialului;
- rezistența materialului la șocuri termice;
- calitatea suprafeței [53].

Pentru caracterizarea cantitativă și calitativă a efectelor induse de acțiunea radiației laser în piesa de prelucrat se recurge la o mulțime de indicatori de performanță, specifici operațiilor tehnologice realizate (tabelul 5.1).

Tabelul 5.1. Indicatorii de performanță pentru diferite operații tehnologice

Indicatori de performanță	Operații tehnologice		
	Debitare	Găurire	Gravare și marcarea
Cantitativi	<ul style="list-style-type: none"> • viteza liniară de debitare v [m/min] • suprafața debitată în unitatea de timp A_t [mm^2/min] • lățimea tăieturii b [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> • volumul (masa) de material erodat la un impuls laser V_i [$\text{mm}^3/\text{impuls}$], M_i [mg/impuls] • elementele geometrice ale alezajului: diametrul d [mm], adâncimea h [mm] 	<ul style="list-style-type: none"> • volumul (masa) de material erodat la un impuls laser V_i [$\text{mm}^3/\text{impuls}$], M_i [mg/impuls] • viteza liniară de gravare sau marcarea v [m/min] • suprafața marcată în unitatea de timp A_t [mm^2/min] • elementele geometrice ale gravării sau marcării: lungimea l [mm], lățimea b [mm], adâncimea h [mm]
Calitativi	<ul style="list-style-type: none"> • precizia dimensională, de formă și de poziție a suprafețelor prelucrate • rugozitatea suprafețelor prelucrate • natura și adâncimea zonei influențate termic (ZIT) • adâncimea zonei de germinare a microfisurilor 		

Lipsa unor indicatori de performanță universală este determinată, pe de o parte, de condițiile particulare ale acțiunii fasciculelor laser la diferite operații tehnologice și, pe de altă parte, de diversitatea extrem de largă a operațiilor și proceselor tehnologice care valorifică energia radiației laser. Acești indicatori de performanță reprezintă de fapt, funcțiile obiectiv care trebuie urmărite la finalul operației de prelucrare stabilită pentru materialul studiat.

Atât factorii de influență cât și funcțiile obiectiv sau de răspuns vor fi pe larg tratate în capitolele următoare cu scopul de a obține optimizarea procesului de prelucrare al materialelor optice transparente.

5.4. Stabilirea condițiilor de cuplare a radiației

În procesul de prelucrare cu fascicul laser, un factor important de care trebuie să se țină seama este gradul de absorbție, respectiv reflexie a luminii de către materialul supus prelucrării. De asemenea, trebuie cunoscute modificările datorate stării termice ale materialului sub acțiunea fascicului laser. La modificările stării termice se va lua în considerare faptul că materialul poate atinge temperaturi de topire sau/și temperaturi de vaporizare a zonei supuse acțiunii radiației laser. Acțiunea energiei calorice, modul de folosire și cantitatea de căldură se pot evalua prin temperatură sau entropie.

La fasciculul laser căldura degajată este absorbită de materialul prelucrat. Se menționează astfel că, acțiunea fascicului laser depinde în mai mare măsură de calitățile materialului care se prelucrează și, îndeosebi, de calitatea suprafeței, gradul de absorbție, reflexie etc.

La prelucrarea cu fascicul laser, operații ce se realizează prin modificarea stării termice a materialului, o importanță deosebită o are coeficientul de absorbție a radiației luminoase. Conform prelucrărilor efectuate pe metale, coeficientul de absorbție variază foarte mult în funcție de starea suprafeței [53].

Se cunoaște că absorbția radiației laser de către solide este funcție de lungimea de undă a radiației și de natura, temperatura, rugozitatea și gradul de impurificare a suprafeței absorbante.

Interdependența coeficient de absorbție – lungime de undă a radiației laser, pentru câteva materiale uzuale este reprezentată în figura 5.6. Influența naturii materialului iradiat este evidentă, motiv pentru care se recomandă radiații laser cu $\lambda > 4 \mu\text{m}$ la prelucrarea materialelor nemetalice [54].

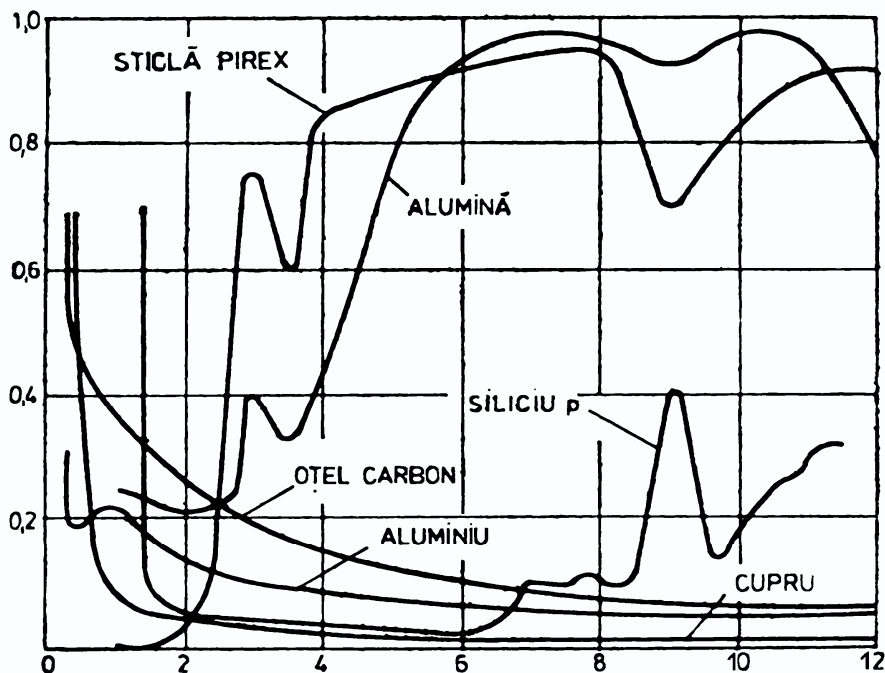


Figura 5.6. Interdependența coeficient de absorbție – lungime de undă λ a radiației laser pentru câteva materiale de interes industrial [54]

Sursa termică determinată de absorbția energiei radiației în corpurile parțial transparente are un pronunțat caracter volumic. De asemenea, rugozitatea suprafeței iradiate și în particular corelația indicatorilor de rugozitate cu lungimea de undă a radiației laser influențează ponderea energiilor reflectată și respectiv absorbită pe suprafață [6], [54]. Astfel energia absorbită va fi transformată aproape integral în căldură. În același context, prezența peliculelor metalice sau dielectrice pe substraturi nemetalice transparente determină diminuarea respectiv creșterea energiei absorbite, în condiții date [54].

Variația extrem de rapidă a reflectanței suprafețelor afectate de radiații laser intense introduce dificultăți în controlul acțiunii tehnologice și poate provoca rebutarea piesei prelucrate. În vederea îmbunătățirii eficienței de prelucrare cu fascicul laser se poate acționa după cum s-a văzut, în primul rând asupra stării suprafeței ce urmează a fi

prelucrată creându-se astfel condițiile de creștere a coeficientului de absorbție a suprafeței și permițând amorsarea radiației în materialul studiat.

Astfel, modalitatea de cuplare a radiației laser pentru prelucrarea materialelor optice parțial transparente are loc atunci când:

- suprafața materialului are o rugozitate mai mare;
- se acoperă suprafața de prelucrat cu un strat subțire de material reflectant sau absorbant;
- se face o tratare termică a piesei [46], [53], [67].

Referindu-ne strict la materialele ce urmează a fi prelucrate cu fasciculul laser, pentru sticlele optice de exemplu, amorsarea radiației laser s-a realizat prin mărirea gradului de rugozitate a pieselor prelucrate (alegerea a trei clase de rugozitate) și prin schimbarea calității suprafeței piesei (prin depunerea de straturi absorbante sau reflectante de ordinul micronilor). Straturile depuse au fost straturi metalice, dielectrice, depuneri de grafit și soluții gel, destinate modificării proprietăților optice ale suprafeței pieselor de prelucrat astfel încât să fie absorbită o cantitate suficientă de energie care să permită procesarea materialului. Aplicarea acestor straturi s-a făcut pe materiale cu rugozități diferite mărindu-se astfel șansa ca sticlele optice să poată fi prelucrate.

Pentru o mai bună amorsare a radiației laser s-a avut în vedere și tratarea termică a materialelor prelucrate prin încălzirea acestora până la temperaturi apropiate de temperatura de topire. În cazul sticlelor optice acest procedeu ar putea da rezultate pozitive cu condiția ca răcirea materialului să se facă în timp îndelungat pentru a nu introduce tensiuni interne în material care să ducă în final la distrugerea acestuia.

La polimeri situația este puțin diferită, deoarece proprietățile optice ale materialelor scad odată cu creșterea temperaturii conform diagramei din figura 5.7.

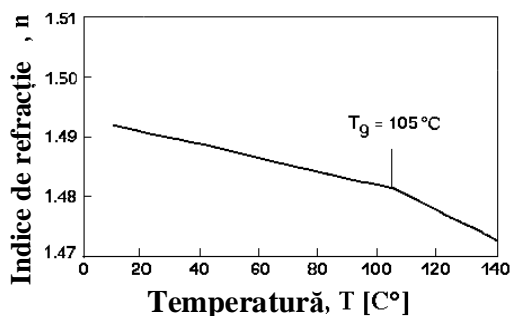


Figura 5.7. Dependența indicelui de refracție de temperatură pentru polimetil metacrilat

Marcarea polimerilor s-a făcut fără modificarea parametrilor optici ai materialelor deoarece s-a urmărit vizualizarea efectelor prelucrării în aceste materiale, motiv pentru care materialul trebuia să fie transparent atât în timpul cât și după prelucrarea cu radiație laser.

5.5. Efecte de interes tehnologic induse de radiația laser în corpuri parțial transparente

În general, pentru prelucrarea alezajelor se pot utiliza atât oscilatori laser cu mediu activ gazos cât și oscilatori laser cu mediu activ solid. Datorită faptului că un alezaj produs de un laser cu mediu activ solid are pereții din zona prelucrată mai puțin înclinați decât la prelucrarea cu un laser cu mediu activ gazos, adică divergența unghiulară a fasciculului laser în primul caz este mult mai mică decât cea provenită de la un oscilator laser cu mediu activ gazos, se recomandă utilizarea în astfel de prelucrări a laserilor cu mediu activ solid (laseri cu Nd-YAG sau laseri cu sticlă dopată cu Nd). Un alt avantaj al acestor instalații laser este acela că dimensiunea petei focale a fasciculului laser este mult mai mică comparativ cu cea a laserilor cu mediu gazos. Laserii pot funcționa în regim continuu sau în regim de impulsuri în funcție de materialul prelucrat. Dacă materialele sunt mai dure și există pericolul distrugerii prin spargere se pot utiliza laseri în impulsuri, laserii în regim de undă continuă având puteri mai mari.

În această situație, aceste lucruri nu sunt suficiente trebuind să se țină seama și de compatibilitatea dintre radiația laser și caracteristicile optice ale materialelor studiate (transmitanță, indice de refracție, absorbție).

Studiile făcute pe materiale de tip safir și rubin sintetic [8], [61], [74] au arătat că alezajele realizate cu ajutorul laserului cu sticlă dopată cu Nd, care funcționează în regim de impulsuri, prezintă deseori microfisuri în jurul orificiului prelucrat. Acestea apar datorită temperaturii extrem de înalte la care este supusă zona în care se prelucrează orificiul, în timpul procesului de prelucrare cu laser. Gradienții mari de temperatură din zona prelucrată cu fasciculul laser pot fi micșorați dacă se încălzesc materialele la temperaturi înalte, înaintea procesului de găurire cu laser.

După cum s-a mai spus orice acțiune de prelucrare cu radiație laser reprezintă, în esență, un transfer controlabil de energie, condiționat de incidența și respectiv absorbția parțială a energiei unui fascicul laser de parametri adecvați pe suprafața supusă prelucrării [58]. Astfel s-a văzut că absorbția radiației laser de către materialele optice joacă un rol important în amorsarea energiei radiației luminoase. În acest sens sticlele optice au fost șlefuite la trei rugozități diferite, pe fiecare astfel de materiale aplicându-se diferite straturi absorbante sau reflectante, după caz, pentru absorbția unei cantități suficiente de energie care să genereze prelucrarea cu radiație laser a pieselor. Conform [58] rugozitatea poate juca un rol important în prelucrarea prin găurire a sticlelor optice deoarece o cantitate tot mai mare de energie este absorbită în material pe măsură ce rugozitatea crește, odată cu acestea mărindu-se și adâncimea de penetrare a materialului.

Alți parametri de interes tehnologic sunt indicii de refracție ai materialelor și transmitanța acestora în funcție de lungimea de undă, cel de-al doilea parametru fiind reprezentat în următoarele figuri pentru diferite materiale de interes pentru această cercetare.

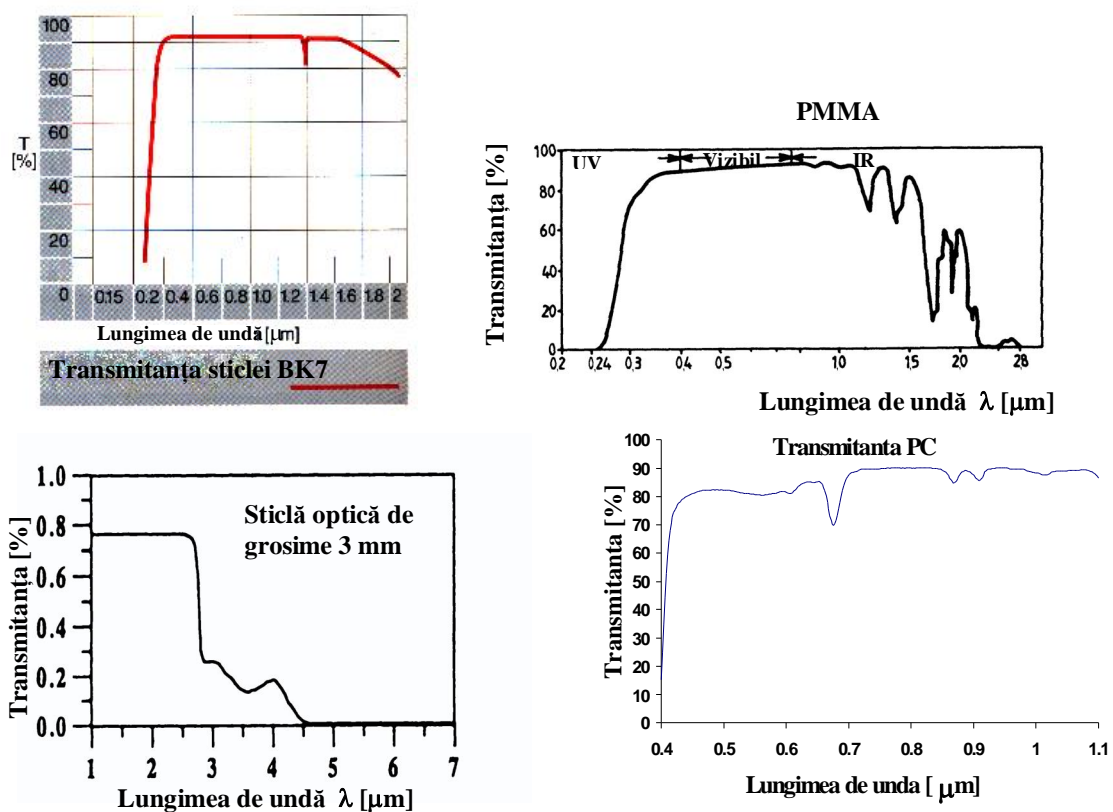


Figura 5.8. Transmitanța pentru materialele prelucrate

Din aceste grafice se observă că pentru sticlele optice este mai probabil ca o radiație laser de lungime de undă $\lambda \geq 5 \mu\text{m}$ să fie compatibilă pentru procesul de găurire laser a acestor materiale, marcarea polimerilor cu ajutorul radiației laser putându-se realiza și la lungimi de undă din infraroșu apropiat (de exemplu $\lambda=1,064 \mu\text{m}$) deoarece cantitatea de energie absorbită nu trebuie să fie foarte mare.

La prelucrarea materialelor cu transmitanță ridicată și căldură latentă de vaporizare și conductivitate termică scăzută (materiale ceramice, polimeri), dacă energia transmisă către interiorul piesei e suficient de mare, consumul de energie pentru vaporizarea superficială a materialului nu limitează încălzirea la temperaturi înalte a substanței aflate în stare condensată în stratul limitrof suprafeței de vaporizare. Astfel substanța respectivă poate dobândi temperaturi superioare temperaturii de vaporizare înainte ca materialul de la suprafață să fi absorbit integral căldura latentă de vaporizare. Rezultă o explozie termică având ca efect intensificarea procesului de eroziune și prelungirea acestuia și după încetarea impulsului laser.

Mecanismul fizic care duce la găurirea laser depinde atât de materialul prelucrat cât și de lungimea de undă și chiar de aspectul pulsului folosit. Într-o primă aproximare se poate aprecia că este valabilă condiția ca energia pulsului să fie egală cu energia calorică, care, acumulată în regiunea de găurit, să o poată aduce la temperatura de vaporizare. Totuși, în unele situații, materialul poate fi îndepărtat încă în faza lichidă prin presiunea de recul a vaporilor formați. La o temperatură mai mică de T_v (temperatura de vaporizare) se poate produce o fierbere și o împrăștiere a fazei lichide și datorită impurităților existente în material.

Indicii de refracție ai materialelor se pot modifica la orice impuritate existentă în piesă, orice centru de absorbție devenind, la densitatea de energie a fasciculului laser, o sursă de căldură locală puternică care conduce la distrugerea materialului. La rândul lor variațiile locale de temperatură duc la variații ale indicelui de refracție, efect nedorit la aceste piese. Acesta este motivul pentru care s-au ales pentru găurirea cu fascicul laser sticle optice cu puritate și omogenitate ridicate. Procesul de marcarea laser pe polimeri a fost aplicat deoarece aceste materiale au caracteristici optice apropiate de cele ale sticlelor și pentru că s-a dorit studierea efectelor induse de radiația laser în materialele optice.

Dacă aceste materiale ar fi încălzite până la o temperatură cât mai apropiată de temperatura de topire și s-ar menține această temperatură constantă pe toată durata prelucrării cu radiație laser, atunci s-ar diminua tensiunile interne din materiale iar calitatea prelucrării ar fi net superioară eliminându-se fisurile ce pot să apară în zona influențată termic.

O metodă eficientă la prelucrarea prin găurire cu radiație laser constă în folosirea unui jet de gaz coaxial cu fasciculul laser. Cele mai uzuale gaze folosite în astfel de aplicații sunt gazele inerte sau cele reactive. Ca și gaz reactiv cel mai utilizat este oxigenul, folosit în special în aplicațiile de prelucrare cu laser a materialelor metalice, în cazul materialelor nemetalice utilizându-se gaze inerte de tipul azotului sau argonului. În unele situații este suficientă aplicarea unui jet de aer coaxial cu fasciculul laser. Prelucrarea cu ajutorul gazului inert se aplică în special în cazul materialelor fragile sau inflamabile care prezintă un coeficient de absorbție ridicat pentru radiația laser utilizată (cum e și cazul sticlelor optice pentru radiația de undă de $10,6 \mu\text{m}$ corespunzătoare laserului cu CO_2). Radiația laser produce topirea, evaporarea sau arderea materialului în zona de incidență a fasciculului, jetul de gaz nereactiv având rolul de a înlătura materialul topit, vaporizat sau oxidat din zona prelucrată și să răcească materialul micșorând procesul de carbonizare al marginii alezajului obținut. Grosimea stratului de material topit din ZIT scade cu creșterea presiunii gazului de lucru. Datorită efectului de răcire realizat de jetul de gaz zona influențată termic poate să fie mai mică, iar statul de material topit și resolidificat să fie cât mai redus.

O altă metodă prin care zona topită va fi mică este aceea în care se folosesc densități de energie mari (fără a depăși însă limita peste care se obține vaporizarea) și timpi de iradiere mici, deoarece în aceste situații căldura se propagă foarte puțin.

Raportul fazelor lichidă și de vapori în materialul prelevat depinde de durata acțiunii radiației laser, în primele momente ale acestei acțiuni ($\sim 50 \mu\text{s}$ pentru metale) prelevarea realizându-se exclusiv în stare de vapori. În continuare ($50\text{-}200 \mu\text{s}$) fracțiunea lichidă cunoaște o evoluție extrem de dinamică, atingând la limită circa 90% din totalul materialului prelevat.

La acțiuni laser de durate și puteri mari, materialul ejectat din zona de prelucrare poate provoca dispersia energiei radiației laser și respectiv blocarea fasciculului incident

prin depunerea de material prelucrat pe elementele de focalizare ale acestuia. În aceste cazuri folosirea unui jet de gaz este chiar necesară. De asemenea trebuie să ținem seama și de masa pe care este poziționată piesa de lucru. Acesta trebuie să fie concepută astfel încât să permită evacuarea materialului prelevat din zona de prelucrare.

5.6. Influențe ale impactului radiației laser – sticlă optică/polimeri optici în zona de prelucrare (ZIT)

Aplicarea radiației laser la prelucrarea materialelor impune în primul rând cunoașterea efectelor ce pot apărea la interacțiunea dintre fasciculul laser și materialul supus prelucrării [35]. Datorită transformărilor de fază care apar la această interacțiune de tipul topire și respectiv evaporare de material, în zona influențată termic ne așteptăm să se observe unele modificări de structură și de proprietăți optico-mecanice. Astfel, în cazul sticlelor este posibil să se observe o colorare a acestora în zona prelucrată urmată de modificarea parametrilor optici (indice de refracție, transparență în ZIT). De asemenea ne așteptăm inclusiv la modificarea transmitanței în zona de prelucrare, caracteristică ce poate fi determinată cu ajutorul analizei spectrale și totodată la apariția fisurilor în zona influențată termic datorate răcirii rapide a sticlei după prelucrare și tensiunilor interne induse de impactul radiației laser-material.

Oricum prelucrarea cu fascicul laser a sticlelor optice prezintă avantaje față de prelucrările convenționale deoarece muchiile tăiate cu fascicul laser sunt curate, egale și puțin rotunjite fără a necesita prelucrări suplimentare, mărindu-se astfel eficiența și reducându-se mult cantitatea pieselor rebutate.

Dacă prelucrarea sticlelor se face cu viteză și putere mai mică se va încălzi o cantitate mai mare de material care datorită greutatei proprii va curge la partea inferioară formând bavuri care pot antrena și goluri sau alte impurități în ZIT. Acest lucru nu este dorit deoarece implică prelucrări ulterioare care pot duce la distrugerea materialului.

În cazul în care sticla conține tensiuni interne rezultate din procedeul de elaborare al acesteia este posibilă rebutarea întregii piese la prelucrarea cu radiație laser prin apariția unor fisuri care se propagă cu ușurință în material.

La materialele polimerice lucrurile stau puțin diferit și aceasta deoarece la acestea nu ne așteptăm la apariția fisurilor ci doar la o colorare poate mai puternică în ZIT, datorată arderii elementelor chimice care intră în componența acestor materiale și bineînțeles modificarea clară a indicelui de refracție n în zona prelucrată.

5.7. Concluzii

În lumina celor de mai sus, de pe poziții tehnologice este esențială evidențierea și valorificarea posibilității de reglare a parametrilor radiației laser în vederea adaptării acestora la cerințele și obiectivele acțiunii tehnologice de prelucrare motiv pentru care, următorul capitol va fi dedicat alegerii acestor parametri.

Prelucrarea materialelor cu radiație laser prezintă câteva avantaje în comparație cu mijloacele clasice folosite până acum. Dintre acestea voi menționa câteva, importante pentru prelucrarea cu laser a materialelor alese (sticle optice și polimeri):

- se poate prelucra o gamă largă de materiale (dure, fragile sau refractare);
- fasciculul laser nu exercită o forță fizică asupra piesei de prelucrat și aceasta nu intră în contact cu alte materiale, evitându-se astfel orice contaminare;
- zona afectată termic (ZIT) în preajma incidenței fasciculului laser cu piesa de lucru este mică;
- se pot executa alezaje cu diametre extrem de mici care în unele cazuri nu mai necesită prelucrări ulterioare;
- cantitatea de energie ce cade pe piesa de prelucrat poate fi controlată precis în timpul operației, iar fasciculul laser poate fi comutat cu mare viteză și precizie, întregul ansamblu fiind ușor de adaptat instalațiilor automatizate;
- fasciculul laser poate pătrunde în zone greu accesibile sau chiar inaccesibile cum este și cazul marcării cu laser în interiorul polimerilor.

6. MODELAREA PRELUCRĂRII CU LASER A MATERIALELOR OPTICE PARȚIAL TRANSPARENTE

6.1. Noțiuni introductive

Cunoașterea în știință se bazează practic integral pe existența unor modele care descriu cu un anumit grad de aproximație realitatea existentă. Astfel, identificarea sistemelor fizice este posibilă în trei moduri: identificarea analitică, adică determinarea modelului matematic pe baza cunoașterii legilor fizice care guvernează starea și evoluția sistemului; identificarea experimentală (empirică), adică determinarea modelului prin prelucrarea matematică a datelor de intrări-ieșiri obținute prin măsurări și respectiv identificarea mixtă, analitică și experimentală.

Modelarea experimentală (aplicată în această teză) presupune în esență alegerea unei anumite forme matematice relativ simplă (cel mai des, polinomială) ce se urmărește a fi particularizată prin identificarea pe baza rezultatelor măsurărilor a coeficienților și/sau exponenților acestor forme. Ca urmare a faptului că sistemele tehnologice moderne sunt complexe, difuze și slab organizate, modelarea acestora se face în prezent practic integral pe cale experimentală.

Se cunoaște deja că în aproape toate domeniile de activitate sunt realizate experimente de către cercetători în vederea evidențierii anumitor aspecte referitoare la un proces sau sistem. Un experiment poate fi definit ca un test sau o serie de teste în care s-au operat mai multe modificări ale parametrilor de intrare astfel încât să poată fi observate și identificate motivele pentru care aceste schimbări ar putea influența parametrii ce rezultă din acest proces.

Experimentul reprezintă o intervenție controlată în evoluția unui sistem (*figura 6.1.*), având ca finalitate verificarea și adâncirea cunoștințelor privind acțiunea factorilor de influență asupra funcțiilor de răspuns ale sistemului și respectiv, determinarea condițiilor optime de funcționare a unui sistem în raport cu criteriile și restricțiile impuse. În orice experiment rezultatele și concluziile care pot fi trase depind în mare măsură de modul în care au fost colectate datele [57], [70].

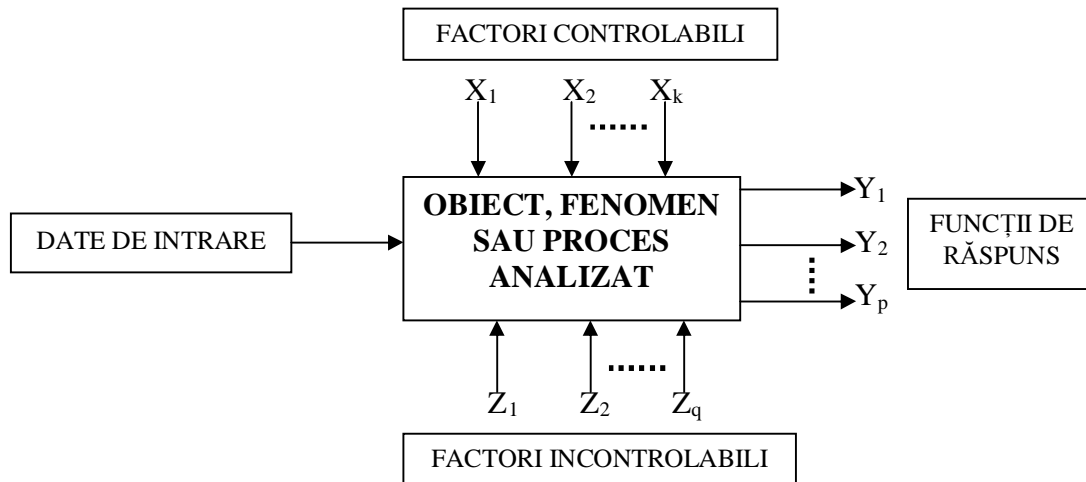


Figura 6.1. Modelul generalizat al unui sistem

Un astfel de sistem poate fi văzut ca o combinație de mașini, procedee, oameni și alte resurse care transformă anumite date de intrare într-o ieșire care are unul sau mai multe răspunsuri vizibile. Unele variabile ale procesului sunt controlabile – *factorii de influență* (X_1, X_2, \dots, X_k), acestea putând fi modificate conform unor intervale de variație prestabilite dar rămânând constante în timpul experimentării, iar altele nu sunt controlabile (Z_1, Z_2, \dots, Z_q) și pot fi factorii legați de mediu sau diferite perturbații care pot influența procesul sau fenomenul respectiv.

Funcțiile de răspuns (funcții obiectiv, indicatori de performanță, criterii de optimizare) definesc și evaluează cantitativ comportamentul și tendințele de evoluție ale sistemului ce se constituie obiect al cercetării, în condițiile date. Obiectul cercetării integrează sistemul supus cercetării experimentale cu mulțimea mijloacelor de testare și măsurare necesare evaluării stării, comportamentului și evoluției sistemului respectiv [57].

În general obiectivele unui experiment includ următoarele aspecte:

- determinarea acelor variabile de intrare care au cea mai mare influență asupra funcției de răspuns (obiectiv);
- determinarea nivelurilor de variație ale factorilor de influență X astfel încât funcția obiectiv Y să fie aproape de valoarea dorită;
- determinarea nivelurilor de variație pentru variabilele cunoscute X astfel încât variația funcției obiectiv Y , să fie cât mai mică;

- determinarea nivelurilor de variație ale variabilele cunoscute X astfel încât efectul variabilelor necontrolabile Z , să fie minim [70].

6.2. Strategii de experimentare

Pentru ca experimentul să poată fi efectuat în condiții convenabile din punct de vedere al costului și volumului măsurării, este necesară minimizarea numărului de încercări sau, mai corect, optimizarea experimentului; este deci necesară o selecție preliminară a factorilor semnificativi și ordonarea lor după influența exercitată asupra sistemului studiat. Ca metode de selectare și ierarhizare a factorilor semnificativi și excluderea din experiment a factorilor ne semnificativi, se utilizează cel mai frecvent metoda analizei dispersionale și metoda balanței aleatoare.

Metoda analizei dispersionale este aplicabilă cu succes pentru un număr de $k < 4$ factori de influență, deoarece volumul calculelor crește exponențial cu numărul de factori analizați, iar interpretarea rezultatelor devine tot mai dificilă.

Metoda balanței aleatoare (cea aplicată în această lucrare) realizează ușor, rapid și economic selectarea și ierarhizarea factorilor semnificativi, restul factorilor fiind integrați în “zgomotul de fond” al experimentului [1, 2, 15].

În acest fel se poate face ulterior o modelare matematică a acțiunii factorilor de influență X_1, X_2, \dots, X_k asupra funcției obiectiv Y . Dintre obiectivele urmărite în urma modelării matematice a unui proces se remarcă:

- studiul și analiza sistemului cercetat cu ajutorul modelului creat;
- mecanismul de acțiune al factorilor de influență asupra procesului sau sistemului studiat;
- verificarea influenței interacțiunii dintre factori asupra sistemului;
- optimizarea procesului în raport cu diferite criterii stabilite.

Principalele cerințe pe care trebuie să le îndeplinească un model matematic se referă la concordanța ce trebuie să existe între valorile estimate ale funcției obiectiv cu ajutorul modelului și valorile reale ale acestei funcții, precum și acuratețea informațiilor obținute în vederea optimizării procesului cercetat.

Pentru alegerea formei matematice corespunzătoare a unui astfel de model este necesar ca cercetătorii să aibe cunoștințe cu caracter general despre legile aplicate sistemelor fizice, să aibe informații cu privire la sisteme și modele similare cu cele cercetate sau chiar încercări proprii de modelare în domeniul respectiv. Aceste etape ale cercetării pentru obținerea modelului matematic sunt bine sistematizate în schema din figura 6.2.

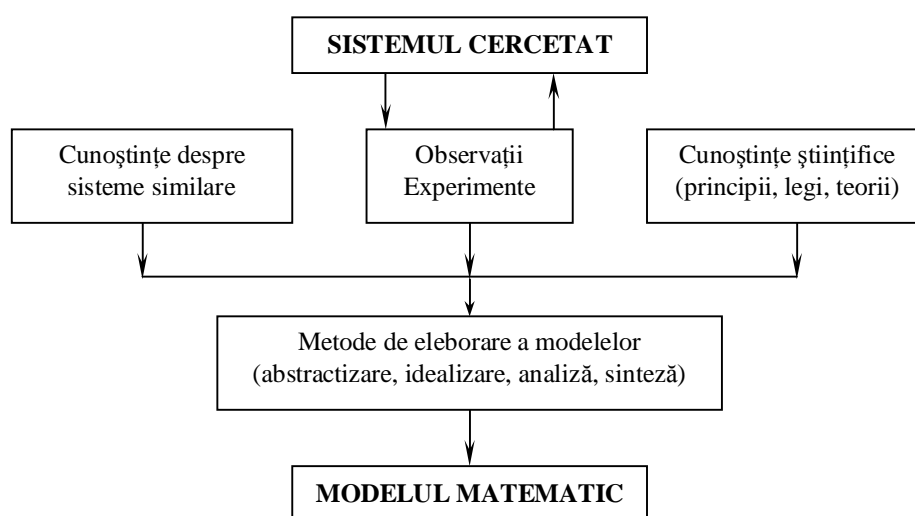


Figura 6.2. Etapele necesare concepării unui model matematic

Se constată că în urma unei analize de sinteză a tuturor datelor legate de sistemul cercetat se poate trece la realizarea modelului matematic. Mai mulți autori [15, 57] consideră că în vederea obținerii modelului matematic final trebuie parcurse o serie de cicluri complete de investigație, organizate iterativ și plasate pe o spirală convergentă către obiectivele cercetării, conform reprezentării din figura 6.3.

Astfel pentru realizarea modelului matematic final se parcurg o serie de cicluri iterative care la rândul lor sunt compuse din câteva etape consecutive și anume:

- cunoașterea aprofundată a obiectului cercetării pentru a adopta structura inițială a modelului matematic,
- conceperea programului de experimentare ținând cont de numărul și nivelurile de variație ale factorilor de influență, de numărul de replici și de randomizarea necesară,

- realizarea programului experimental,
- analiza statistică a rezultatelor experimentale finalizată prin testarea adecvanței și a preciziei modelului matematic adoptat inițial,
- obținerea modelului matematic final.

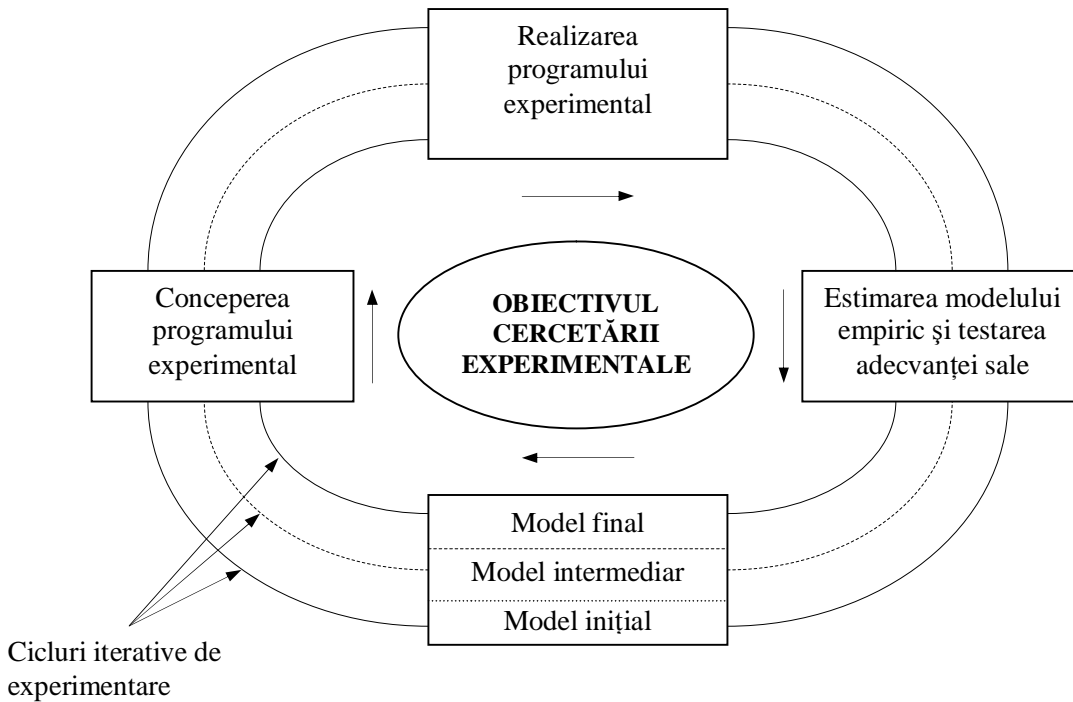


Figura 6.3. Algoritm general al cercetării experimentale

În vederea realizării modelului matematic trebuie adoptată o strategie de experimentare sau de concepere a programului experimental. Există o multitudine de astfel de strategii și de aceea trebuie aleasă cea strategie optimă care să permită obținerea a unui număr cât mai mare de informații sau realizarea unui număr cât mai mic de teste pentru sistemul studiat, fără a afecta însă precizia de estimare a modelului matematic. Cu toate acestea la dispoziția cercetătorului stau două strategii principale diferite și anume strategia clasică și respectiv cea modernă.

Strategia modernă, denumită și *strategia Box-Wilson* [15, 16, 57] care urmează a fi utilizată în această lucrare, este caracterizată prin faptul că în fiecare încercare se modifică valoarea tuturor factorilor existenți după sloganul “toți factorii în fiecare moment”. Această strategie de experimentare se numește strategia multifactorială deoarece implică un experiment factorial care presupune variația tuturor factorilor de

influență pe fiecare nivel de variație, în fiecare moment. Astfel influența fiecărui factor asupra valorilor funcției obiectiv este determinată de toate încercările efectuate, micșorându-se astfel volumul de experimente, iar certitudinea rezultatelor este mult mai ridicată. Mai mult decât atât, modelul matematic inițial (de regulă un model liniar), conține informații asupra direcției în care se găsește valoarea optimă a funcției obiectiv.

După ce s-a stabilit modelul matematic al experimentului ce modelează procesul tehnologic, în cazul de față al prelucrării cu fascicul laser a materialelor optice particularizată pentru fiecare categorie de material, se poate trece la următoarea etapă și anume căutarea domeniului optim.

În cazul analizat, prin domeniu optim se înțeleg acele valori ale parametrilor fasciculului laser pentru care muchiile tăieturii sunt drepte și paralele sau alezajul (la găurire) care se obține are formă apropiată de cea cilindrică, deci adaosul de prelucrare este mic, iar eficiența economică de prelucrare este ridicată.

În cercetarea inginerescă se utilizează în mod frecvent două metodologii de optimizare: metoda gradientului și metoda simplexurilor.

Metoda gradientului se mai numește și metoda ascensiunii rapide și are ca bază de plecare punctul central al unui experiment factorial. Pe parcursul deplasării se stabilesc experimental, la fiecare pas, valorile rezultante ale funcției de răspuns. Deplasarea continuă până la găsirea unui extrem local. Acest punct reprezintă centrul unui nou experiment factorial, care va furniza un nou model liniar, corespunzător noilor condiții. Noul experiment factorial poate fi folosit în continuare la optimizarea procesului tehnologic, aplicându-se încă o dată metoda gradientului.

Cealaltă metodă de optimizare, *metoda simplexurilor* este sensibilă la erori experimentale, de aceea se recomandă ca intervalele de variație să fie de 5 până la 10 ori mai mari decât dispersia standard la determinarea factorilor respectivi, aspect care în cazul experimentului nostru concret nu este posibil, deoarece instalația laser nu are posibilități de variație pe intervale prea mari a parametrilor ei [74].

Astfel, se poate spune că optimizarea unui proces tehnologic este bazată pe conceptul de suprafață de răspuns, care arată că dacă forma relației matematice dintre funcția de răspuns (obiectiv) și factorii de influență nu este cunoscută, ea poate fi aproximată cu o expresie matematică care să redea cât mai bine legătura dintre factorii de

intrare și cei de ieșire din proces. Modelul matematic cel mai des întâlnit este modelul polinomial de grad mic și anume dacă răspunsul este bine modelat de o funcție liniară, atunci se utilizează un polinom de ordinul I iar dacă în sistem există o zonă de curbură, atunci se poate trece la o modelare cu un polinom de ordinul II. Aproape toate problemele ce implică conceptul de suprafață de răspuns utilizează unul sau ambele tipuri de polinoame (gradul I sau II) ca modele matematice. Este puțin probabil ca un model matematic polinomial să reprezinte o aproximare rezonabilă a relației funcționale dintre factorii de influență și funcția de răspuns, pe întreg domeniul variabilelor de intrare, dar într-o regiune relativ restrânsă aceste modele sunt adecvate. Metoda suprafeței de răspuns este o metodă secvențială. De multe ori analiza se efectuează într-un punct al suprafeței care este departe de optim utilizând condițiile curente de experimentare (figura 6.4) [9, 70].

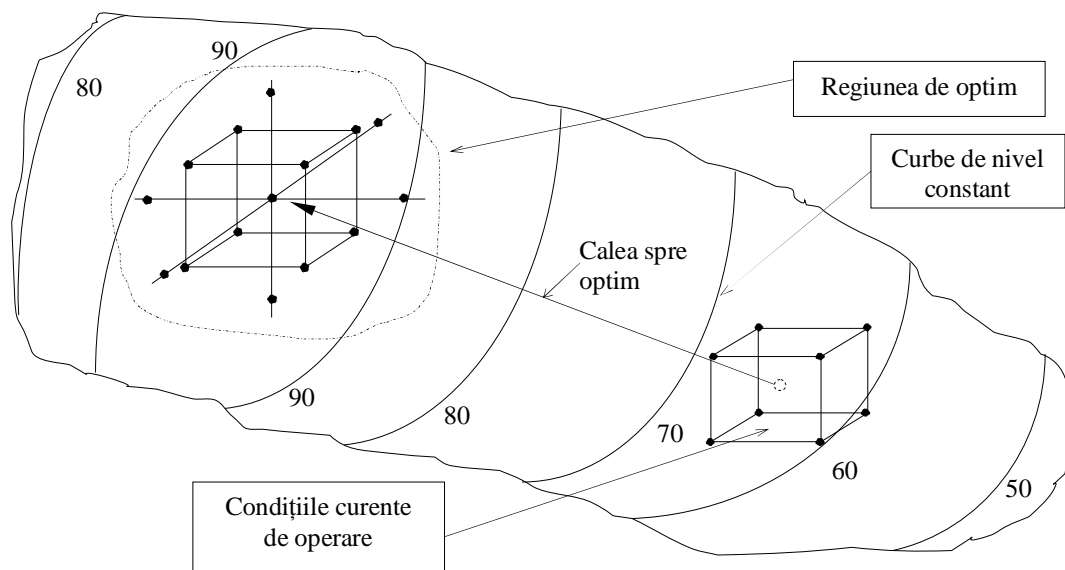


Figura 6.4. Natura secvențială a metodei suprafeței de răspuns pentru determinarea optimului

Scopul utilizării acestei metode este acela de a îl conduce pe experimentator de-a lungul căii spre optim până la regiunea în care se găsește optimul. În acea regiune se aplică modele polinomiale de ordin II până la identificarea cu precizie a optimului. Aceste modele de ordin superior pot fi explicitate fie prin dirijarea factorilor de influență

pe trei niveluri (ceea ce mărește volumul experimentării), fie prin utilizarea unui experiment central compus.

În mod obișnuit, studiul suprafeței de răspuns se face prin secționarea acesteia cu plane paralele cu planul factorilor de influență. Curbele rezultate din intersecția suprafeței de răspuns cu aceste plane paralele sunt denumite curbe de nivel constant.

6.3. Metode de analiză statistică în cercetarea experimentală

Cele mai utilizate metode de analiză statistică clasică a datelor experimentale sunt analiza dispersională și analiza regresională [15], [16], [22], [37], [52], [71].

Analiza dispersională denumită și analiza variației, este o metodă statistică de analizare a datelor de măsurare care sunt de fapt valori ale unor funcții obiectiv obținute experimental ce depind de unul sau mai mulți factori de influență cu acțiune simultană. Scopul analizei dispersionale este acela de a stabili semnificația și gradul de interacțiune a unei mulțimi de factori de influență asupra funcției obiectiv studiate.

Analiza dispersională realizează:

- gruparea factorilor de influență în semnificativi și respectiv nesemnificativi în raport cu funcția de răspuns studiată;
- ierarhizarea factorilor semnificativi după gradul de influență asupra funcției de răspuns.

Se remarcă faptul că analiza dispersională nu își propune și nici nu poate realiza modelul matematic al sistemului cercetat $Y = f(X_i)$, ($i=1 \dots k$).

Se știe că în general asupra orăru sistem acționează simultan mai mulți factori, aleatori și sistematici, fiecare având o anumită influență asupra performanțelor acestuia. Prin analiza dispersională sunt separate efectele produse de variația factorilor aleatori de efectele cauzate de factorii sistematici (factori de influență controlați), apreciindu-se astfel caracterul și gradul de influență al fiecărui factor. Selectarea și ierarhizarea factorilor de influență semnificativi se poate face și prin analiză regresională, dar volumul experimentului necesar crește odată cu creșterea numărului de factori de influență din proces.

În cazul cel mai general, legătura dintre funcția obiectiv Y și factorii de influență în sistemele fizice, poate fi scrisă sub forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k, Z_1, Z_2, \dots, Z_q, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d) \quad (6.1)$$

unde:

X_1, X_2, \dots, X_k – factori de influență controlabili;

Z_1, Z_2, \dots, Z_q – factori de influență necontrolabili, aleatori, care generează erorile aleatoare;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$ – parametri statistici, de regulă necunoscuți, numiți coeficienți de influență.

Factorii de influență pot fi cantitativi sau calitativi, în domeniul cercetat ei situându-se pe diferite niveluri fixate de experimentator.

Dacă toți factorii de influență X_1, X_2, \dots, X_k prezintă niveluri discrete numerice sau nu, analiza devine calitativă – analiza dispersională (descrisă mai sus).

Dacă toți factorii de influență X_1, X_2, \dots, X_k sunt variabile continue, atunci analiza devine cantitativă – analiza regresională.

Analiza regresională are ca obiectiv principal conceperea și realizarea modelului matematic regresional al obiectului cercetării $Y = f(X_i)$, care să descrie, în mod adecvat, comportarea sistemului respectiv în domeniul dat al experimentării. Modelele regresionale se pot utiliza și ca modele deterministe pentru identificarea stării și prevederea comportamentului obiectului cercetării precum și pentru optimizarea și conducerea acestuia în spațiu și timp.

Scopurile analizei regresionale sunt deci:

- identificarea modelului matematic adecvat pentru descrierea obiectului cercetării;
- analiza caracterului și gradului de influență a diferiților factori cu ajutorul modelului obținut;
- definirea valorilor optime ale factorilor de influență în raport cu funcția obiectiv Y sau cu alte funcții de optimizare ale obiectului cercetării și conducerea optimală a acestuia.

Dacă unii factori de influență prezintă niveluri discrete, iar alții sunt mărimi continue, analiza este a covarianței.

În cazul cercetării unui obiect, fenomen sau proces, una din problemele cele mai des întâlnite este aceea de a explicita pe baza rezultatelor experimentale, dependența funcțională (regresională) factori de influență – funcții obiectiv. Una din metodele aplicate în mod curent în prelucrarea rezultatelor măsurătorilor prin analiză regresională este metoda celor mai mici pătrate, metodă care permite stabilirea coeficienților de regresie pentru o formă impusă a relației funcționale dintre variabilele independente și variabila dependentă.

După cum s-a mai văzut, această relație poate fi de tipul unui polinom de ordinul I, care pentru o suprafață de răspuns ce prezintă o zonă de curbura se transformă într-un polinom de ordin superior (II). În acest caz modelarea se face cu ajutorul experimentelor factoriale care realizează într-o primă etapă identificarea factorilor de influență și precizarea funcției obiectiv urmărite. Cea de-a doua etapă este cea a stabilirii domeniului de experimentare care presupune două faze:

- stabilirea punctului central al experimentării;
- stabilirea intervalelor de variație ale factorilor de influență.

Punctul central al experimentului este astfel ales încât să furnizeze cele mai convenabile valori ale funcțiilor obiectiv. Intervalele de variație ale factorilor de influență sunt valori care adunate sau scăzute la coordonatele punctului central determină nivelul superior și respectiv inferior al factorului considerat într-un experiment dat.

Obiectivul principal al experimentului factorial în general, este stabilirea modelului matematic, în primă fază polinomial liniar al sistemului investigat, adică determinarea valorii concrete a coeficienților de regresie b_j din relația (6.2):

$$\tilde{y} = \sum_{j=0}^k b_j x_j, \forall k \geq 0 \quad (6.2)$$

Astfel forma unui model polinomial de ordinul întâi se poate scrie:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j \quad (6.3)$$

iar pentru un polinom de ordinul doi ecuația va fi următoarea:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j \quad (6.4)$$

în care:

y – funcția obiectiv;

x_j – factorii de influență;

b_0, b_j, b_{jj}, b_{ij} - coeficienții de regresie [15], [23].

Interpretarea rezultatelor modelării prin experiment factorial se bazează pe semnul și mărimea coeficienților de regresie care arată sensul și mărimea influenței factorilor și de asemenea se bazează pe adecvanța sau neadecvanța modelului găsit.

Neconcordanțele între experimentele preliminare și rezultatele experimentelor factoriale pot să aibe diverse cauze, între care:

- informații apriorice necorespunzătoare,
- caracter monofactorial al informației inițiale,
- erori de măsurare,
- caracterul local al explorării multifactoriale.

Adoptarea deciziilor este influențată de trei categorii de elemente:

- adecvanța sau inadecvanța modelului liniar,
- caracterul semnificativ sau nesemnificativ al coeficienților de regresie,
- poziția relativă a domeniului explorat prin experiment în raport cu domeniul de optim.

Deciziile care se iau depind în primul rând de adecvanța modelului și în al doilea rând de semnificația coeficienților.

6.4. Contribuții privind determinarea unui model sistemic generalizat pentru procesul tehnologic de prelucrare cu radiație laser a materialelor optice

În cele ce urmează se vor pune în evidență etapele premargătoare modelării experimentale ale procesului de prelucrare cu fascicul laser ale materialelor optice transparente pentru radiații de undă din domeniul vizibil.

Astfel, va trebui să stabilim factorii de influență și respectiv funcțiile obiectiv, adică mulțimea de elemente intrări și respectiv mulțimea de elemente ieșiri care fac ca această prelucrare să fie posibilă.

Pentru a simplifica puțin această etapă de stabilire a factorilor de influență și a funcțiilor obiectiv s-a conceput, realizat și studiat un model sistemic generalizat. În acest scop, ca o primă etapă, a fost necesară realizarea unei scheme logistice pentru prelucrarea cu radiație laser a materialelor optice reprezentată în figura 6.5. Schema logică reprezintă succesiunea proceselor și etapelor ce trebuie urmărite la prelucrarea materialelor optice.

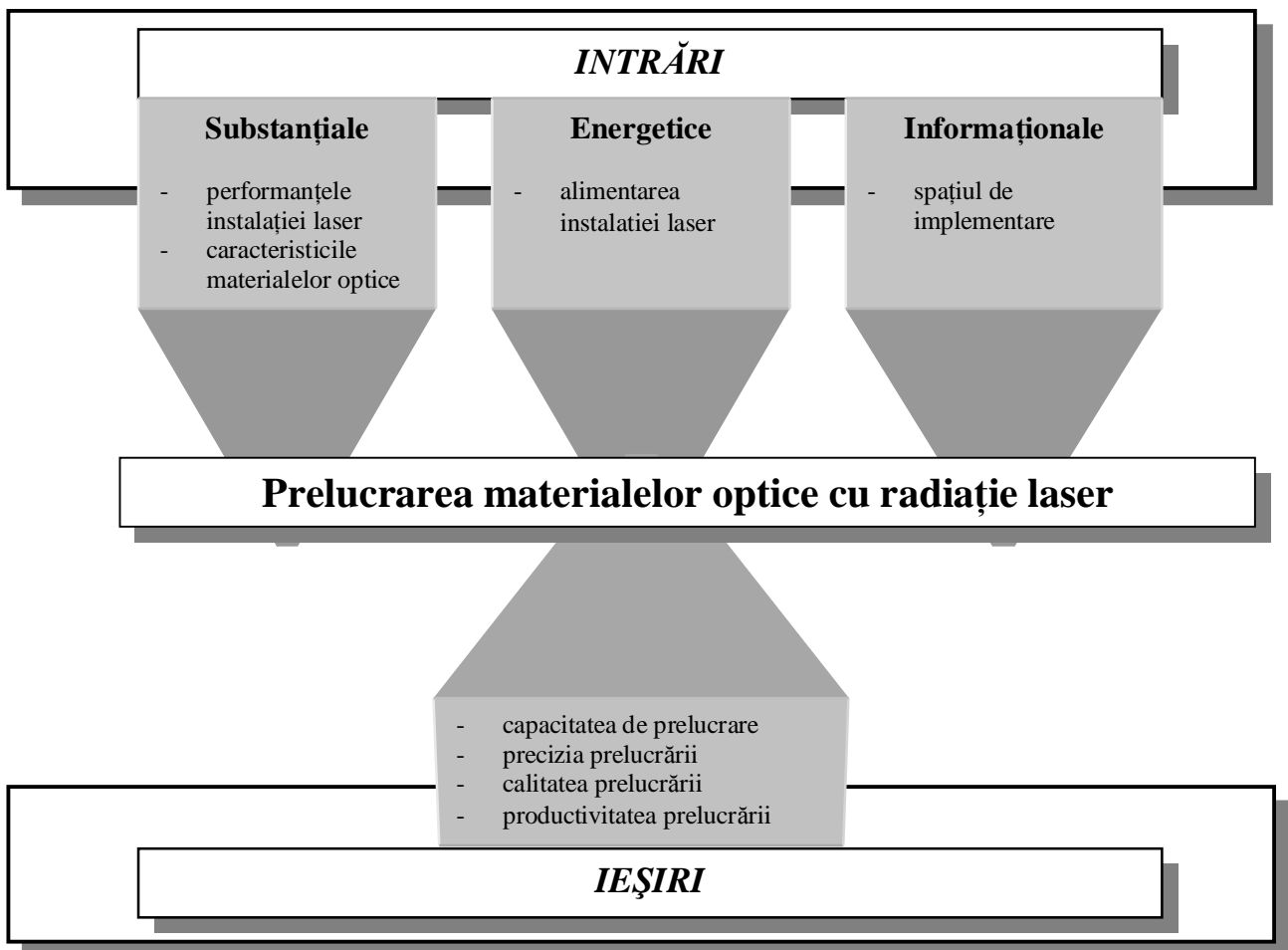


Figura 6.5. Schema logică a prelucrării cu radiație laser a sticlelor optice [4]

Analiza schemei logistice într-o manieră originală de punere a problemei, conduce la următoarele concluzii:

A. INTRĂRILE, sunt reprezentate de către următoarele componente:

1. Intrarea substanțială, ține cont atât de performanțele radiației laser cât și de caracteristicile și proprietățile materialelor optice. Toți acești parametri vor fi

corespunzător aleși pentru ca prelucrarea materialelor să aibe loc în condiții optime. Între acești parametri există o strânsă interdependență astfel încât alegerea parametrilor instalației laser se va face luând în considerare și proprietățile materialelor optice. Detalierea acestora se va face în cele ce urmează.

2. Intrarea energetică, se referă la cantitatea de energie care trebuie dozată în spațiul de lucru pentru ca prelucrarea materialului optic să se facă fără fracturare (sau să fie limitată pe o suprafață îngustă). Este de preferat ca prelucrarea (în cazul găuririi cu laser) să aibe loc prin vaporizarea directă a materialului din zona prelucrată.

3. Intrarea informațională, este reprezentată de datele privitoare la condițiile de mediu (temperatură, umiditate, praf, vibrații etc.) care sunt foarte importante în vederea repetabilității prelucrării în aceleași condiții, pentru obținerea unor rezultate cât mai reale.

B. IEȘIRILE, sunt reprezentate de elementele care caracterizează prelucrarea propriu-zisă a materialelor optice cu radiația laser. Acestea se referă la posibilitatea de prelucrare în condiții optime a acestora, la calitatea și precizia prelucrării și de asemenea și la productivitatea acestui proces în ideea robotizării și automatizării prelucrării.

Pomind de la schema logică a prelucrării cu radiație laser a materialelor optice se poate contura modelul sistemic generalizat al acestui proces (*figura 6.6*).

Structurarea acestui model se face luând în considerare în primul rând variabilele de intrare în proces care constituie de fapt factorii de influență despre care menționăm în capitolul anterior, urmărindu-se în permanență niște variabile de ieșire, adică funcțiile obiectiv. Pentru a menține aceleași condiții de prelucrare trebuie să avem posibilitatea de reglare a parametrilor din proces prin intermediul variabilelor de reglare.

Așa cum se poate observa și în *figura 6.6*, componentele modelului sistemic generalizat conțin următoarele elemente:

A. Variabilele de intrare. Acestea sunt constituite din toți factorii care sunt importanți în procesul de prelucrare, motiv pentru care, factorii de influență vor depinde atât de instalația laser cu care se efectuează prelucrarea cât și de caracteristicile și proprietățile pieselor prelucrate (în cazul de față, sticle optice și materiale polimerice transparente). După caz, poate să existe și o a treia categorie de variabilă de intrare legată de gazul de lucru, doar dacă acesta este folosit în timpul prelucrării cu laser a materialelor optice pentru o îndepărtare corespunzătoare a materialului topit.

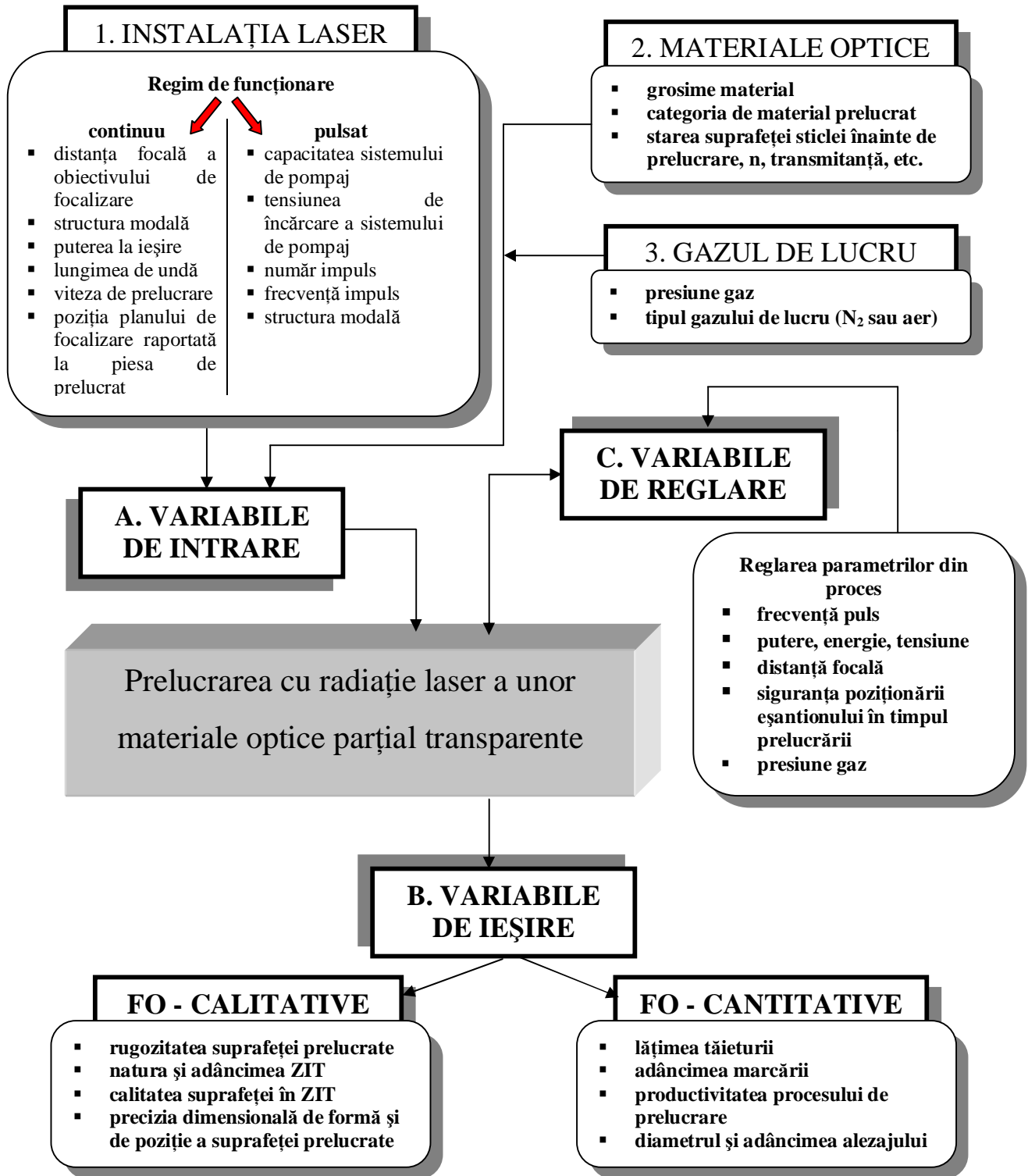


Figura 6.6. Schema modelului sistemic generalizat de prelucrare a unor materiale optice cu radiație laser [4]

S-au stabilit factorii de influență cei mai semnificativi cu privire la instalația laser cu care se prelucrează în funcție de regimul de lucru aplicat, ca fiind:

- poziția planului de focalizare raportată la piesa de prelucrat: se referă la deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fasciculului laser, planul de focalizare al fasciculului putând fi situat pe suprafața piesei, în interiorul piesei sau în exteriorul piesei, la partea inferioară;
- distanța focală a obiectivului de focalizare (stabilită în funcție de lentila utilizată în funcționare);
- capacitatea sistemului de pompaj, pentru care se poate stabili câteva niveluri de variație;
- tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj, pentru care de asemenea se pot stabili câteva niveluri de variație în funcție de posibilitățile de reglare a parametrilor instalației laser;
- numărul de impulsuri al instalației laser pentru care se poate stabili câteva niveluri de variație;
- frecvența impulsurilor;
- structura modală (pentru găurire și marcarea, deoarece se dorește ca spotul laser – pata focală – pentru aceste prelucrări să fie cât mai mică, structura modală necesară este cea de tipul TEM_{00});
- puterea la ieșire a fasciculului și viteza de deplasare a fasciculului în cazul marcării după contur rectiliniu determinat.

O altă categorie de variabile de intrare o constituie cea legată de caracteristicile și proprietățile materialelor optice. Din acest punct de vedere factorii de influență importanți îi constituie:

- grosimea materialului, acest parametru putând fi ales corepunzător puterii fasciculului laser;
- clasa de sticlă optică prelucrată, referindu-ne în acest caz la sortul de sticlă ales în funcție de clasa din care face parte – crown sau flint și respectiv categoria de polimer utilizată în procesul de prelucrare – polimetil metacrilat sau policarbonat;

- starea suprafeței înainte de prelucrare care poate fi mată, polisată, acoperită cu straturi absorbante (negru de fum) sau cu diferite straturi metalice, dielectrice – reflectante sau antireflectante;
- proprietăți optice și termice ale materialelor (n , transmitanță, absorbție, T_g , etc).

B. Variabilele de ieșire. Acestea sunt reprezentate de funcțiile obiectiv urmărite care în acest caz pot fi: lățimea tăieturii, adâncimea marcării, productivitatea procesului de prelucrare, precizia dimensională și de formă a suprafeței prelucrate, calitatea suprafeței prelucrate în ZIT, etc. Trebuie precizat că unele din aceste variabile pot fi măsurabile (cu valori fizice), altele pot fi doar observate micro sau macroscopic și catalogate ca atare sau prin factori de calitate stabiliți de cercetător.

C. Variabilele de reglare. În procesul de prelucrare trebuie reglați anumiți parametri pentru a obține funcțiile de răspuns corespunzătoare. Parametrii asupra cărora trebuie să se intervină sunt de regulă cei din categoria variabilelor de intrare și anume:

- frecvența pulsului,
- puterea, energia laser,
- tesiunea de încărcare a sistemului de pompaj,
- distanța focală sau poziția planului de focalizare,
- siguranța poziționării piesei în timpul prelucrării,
- presiune gaz de lucru, etc [1].

În final se va analiza precizia dimensională și de formă a alezajelor, exprimată relativ prin intermediul coeficienților de variație a funcțiilor de răspuns. Se va evidenția ordinea ierarhică a variabilelor independente care influențează semnificativ această precizie [61] și se va trece la optimizarea procesului [21], [42], [43], [55], [56], [69], [75] conform celor spuse mai sus.

7. CERCETĂRI EXPERIMENTALE

7.1. Obiectivele și condițiile experimentale la prelucrarea prin găurire cu radiație laser a sticlelor optice

7.1.1. Condițiile cercetării experimentale

Studiul din această teză de doctorat s-a realizat cu scopul de a demonstra că sticlele optice se pot prelucra prin acest procedeu tehnologic fără ca piesele să prezinte defecte majore sau să se distrugă în urma prelucrării. Condiția necesară pentru ca un material să poată fi procesat cu laser este cuplarea radiației laser incidente cu suprafața materialului respectiv, condiționată de iradierea suprafeței materialului și de absorbția cel puțin parțială, dincolo de anumite valori de prag, a energiei radiației de către materialul iradiat. În acest scop, stabilirea funcțiilor obiectiv (de răspuns) joacă un rol important în alegerea corectă a nivelurilor factorilor de influență care să ducă la optimizarea procesului de prelucrare. Inițial sticlele optice s-au prelucrat pe o instalație laser cu $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ cu mediu solid Nd-sticlă, care funcționa în regim de lucru pulsant, urmărindu-se în special comportamentul materialelor optice la interacțiunea cu radiația laser.

Analizând însă transmitanța acestor materiale pentru diferite lungimi de undă (vezi *figura 5.8*) s-a constatat că majoritatea sticlelor optice sunt transparente pentru lungimi de undă $< 3 \mu\text{m}$. Astfel s-a ajuns la concluzia că un laser cu lungime de undă $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ (Nd-sticlă sau Nd-YAG) nu va putea prelucra aceste materiale decât probabil după găsirea unei modalități de amorsare a radiației în piesa de prelucrat. Acesta este și motivul pentru care se recomandă acoperirea suprafețelor acestor materiale cu straturi subțiri depuse în vid, de materiale absorbante și chiar reflectante. Grosimea stratului depus este între 200-300 nm. Stratul depus au fost:

- absorbante: dielectric – PVC (policlorură de vinil); grafit; sol-gel – $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$.
- reflectante: un aliaj de argint (75% Ag, 25% Cd, Zn).

Tot datorită transmitanței sticlelor optice s-a pus problema prelucrării acestor materiale și cu radiații laser de lungimi de undă mai mari ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$), folosindu-se

laserii cu CO₂ pentru care piesele optice devin absorbante. În acest caz, amorsarea radiației a avut loc și fără tratarea specială a suprafeței materialelor. Prelucrarea prin găurire laser s-a realizat în această situație atât în regim continuu cât și în regim pulsant, la prelucrarea prin debitare cu laser renunțându-se deoarece materialele prelucrate au tendința de spargere și fragilitate ridicată.

7.1.1.1. Materiale

Materialele prelucrate în aceste condiții au fost sticlele optice BK7 (bor cron – sort german), SF5 (flint greu - sort german) și TF101 (flint greu – sort rusesc) ale căror caracteristici sunt prezentate în *tabelul 7.1*.

Tabelul 7.1. Caracteristicile principale ale materialelor prelucrate

Material	Proprietățile materialului prelucrat					
	n_d [-]	v_d [-]	ρ [g/cm ³]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	T_v [°C]	τ_i [-]
BK7	1,516	64,17	2,51	7,1	557	0,991
SF5	1,672	32,21	4,07	8,2	435	0,950
TF101	1,647	33,87	3,86	8,4	446	0,970

în care:

- n_d – indice de refracție
- v_d – coeficient de dispersie (numărul lui Abbé)
- ρ – densitate specifică
- α – coeficient de dilatare liniară
- T_v – temperatura de vitrifiere
- τ_i – transmitanța spectrală internă.

Sorturile de sticlă au fost prelucrate atât neacoperite, așa cum au fost obținute după tăierea cu disc abraziv, cât și acoperite cu straturi depuse în vid, absorbante sau reflectante. Astfel, s-au pregătit pentru prelucrare eșantioane sub formă de lamele dreptunghiulare de 40x50 mm din SF5, 40x40 mm din BK7 și 35x40 mm din TF101, fiecare de trei grosimi diferite: 1; 1,5 și 2 mm. De asemenea s-a luat în considerare și starea suprafeței care urma să fie prelucrată, motiv pentru care lamelele au fost aduse la rugozități diferite pornindu-se de la $Ra_1 = 0,02$; la $Ra_2 = 0,57$ și $Ra_3 = 1,12$; prima rugozitate permițând eșantioanelor să fie transparente pentru radiația vizibilă. Pentru a

mări capacitatea de absorbție a radiației laser s-au mai făcut următoarele combinații: pe o față a lamelei dreptunghiulare s-a păstrat rugozitatea Ra_1 iar pe cealaltă față s-a mărit rugozitatea piesei la Ra_2 sau Ra_3 ; pe lamelele cu rugozitate Ra_1 , Ra_2 sau Ra_3 s-a depus doar pe una din fețe (S_1) un strat de 200-300 nm de aliaj de Ag sau PVC pe o suprafață circulară de diametru $\Phi 20$ mm (figura 7.1).

În final s-a folosit și un eșantion de sticlă obișnuită de 3 mm grosime, care nu are proprietăți optice la fel de bune ca sticlele optice aflate în studiu, pentru a putea face o comparație a prelucrabilității acestor materiale.

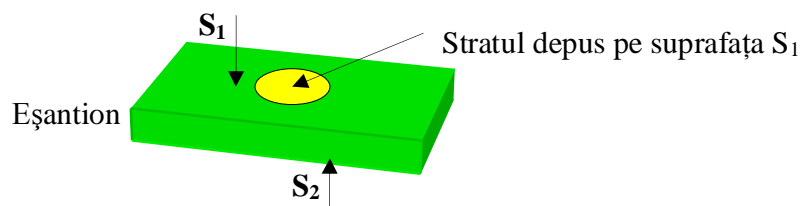


Figura 7.1. Eșantionul supus prelucrării cu radiație laser

7.1.1.2. Instalații laser utilizate

A) Instalația laser de prelucrare Nd-Sticlă

Pentru realizarea experimentului s-a utilizat o instalație laser cu mediu solid de la A.E.M. Timișoara, de proveniență chinezească, cu substanța activă sticlă dopată cu neodim (Nd-sticlă), care funcționează în regim de impulsuri (figura 7.2).

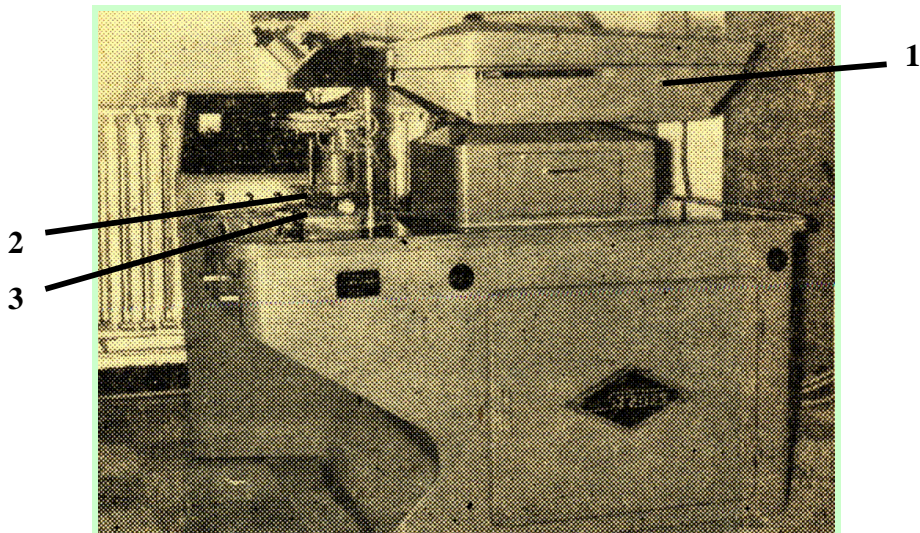


Figura 7.2. Instalația laser cu mediu solid (sticlă dopată cu neodim)
de la AEM Timișoara

Materialele optice au fost prelucrate atât neacoperite dar la diferite rugozități cât și acoperite cu diferite straturi subțiri, pentru modificarea parametrilor optici, astfel încât să se depășească valoarea de prag a intensității necesară pentru declanșarea efectelor erozive în materialele studiate.

În figură s-a notat cu (1) oscilatorul laser care este cu mediu activ solid, sticlă dopată cu Nd, bara de sticlă având dimensiunile $\Phi 8 \times 220$ mm. Lungimea de undă a radiației laser este de $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Structura modală a fasciculului laser emis este de tip monomod, reprezentare gaussiană TEM_{00} . Energia impulsurilor poate fi reglată în limitele 0,5-20 J, iar frecvența maximă de repetiție a impulsurilor este de 80 imp/s. Durata impulsurilor este de ordinul 0,25...1,2 ms. Instalația laser mai este prevăzută cu o masă de lucru staționară, în coordonatele X-Y-Z (2), și cu un dispozitiv de alimentare cu piese, (3).

Schema de principiu a oscilatorului laser de la A.E.M. este prezentată în figura 7.3. Mediul activ (1), este o bară de sticlă dopată cu Nd. Rezonatorii utilizați sunt deschiși și constau din două oglinzi de capăt, plane, plasate perpendicular pe axa longitudinală a mediului activ, permițând cuplarea radiației din rezonator în exterior. Oglinda (2) este total reflectătoare și oglinda (2') este parțial reflectătoare.

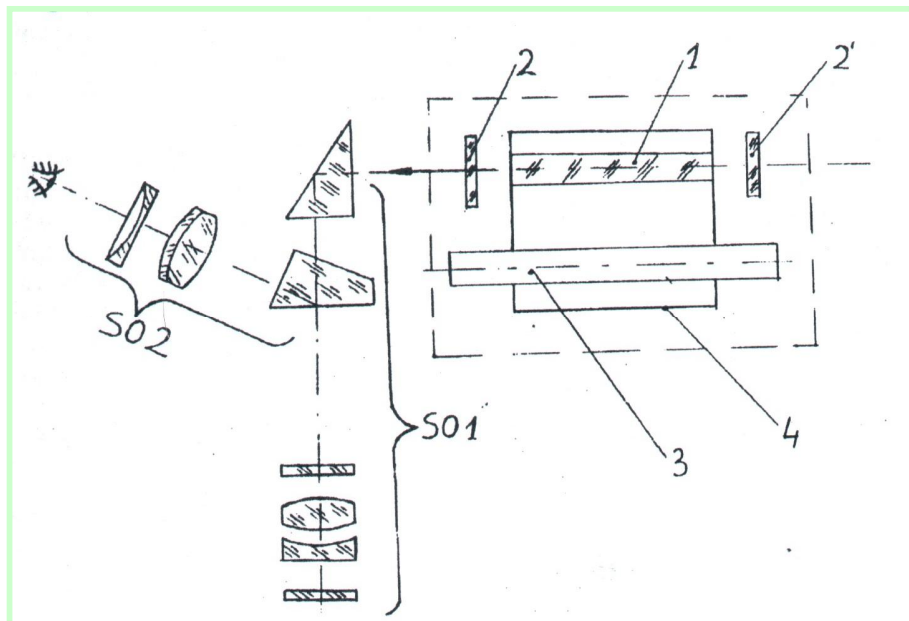


Figura 7.3. Schema de principiu a oscilatorului laser

Pompajul se face cu un tub flash cu Xe, (3). Pentru ca iluminarea să fie și mai intensă carcasa (4) are pereții interiori reflectorizanți. Energia radiată este concentrată într-un fascicul de secțiune mică prin intermediul unui sistem optic notat SO1. Sistemul optic notat cu SO2 permite poziționarea fascicului laser în centrul suprafeței de prelucrat.

B) Instalația laser de prelucrare cu CO₂ (București)

Instalația laser cu CO₂ folosită are lungimea de undă $\lambda=10,64 \mu\text{m}$, motiv pentru care se presupune (datorită transitanței materialelor ce trebuiesc prelucrate) că în această situație prelucrabilitatea materialelor este deja rezolvată, urmând să se stabilească alți parametrii de ieșire, care pot să țină de calitatea suprafeței prelucrate și ZIT. Experimentele au fost realizate pe o instalație laser de mare putere cu CO₂ de la Institutul de fizică atomică din București (IFTAR) a cărei schemă bloc este prezentată în figura 7.4.

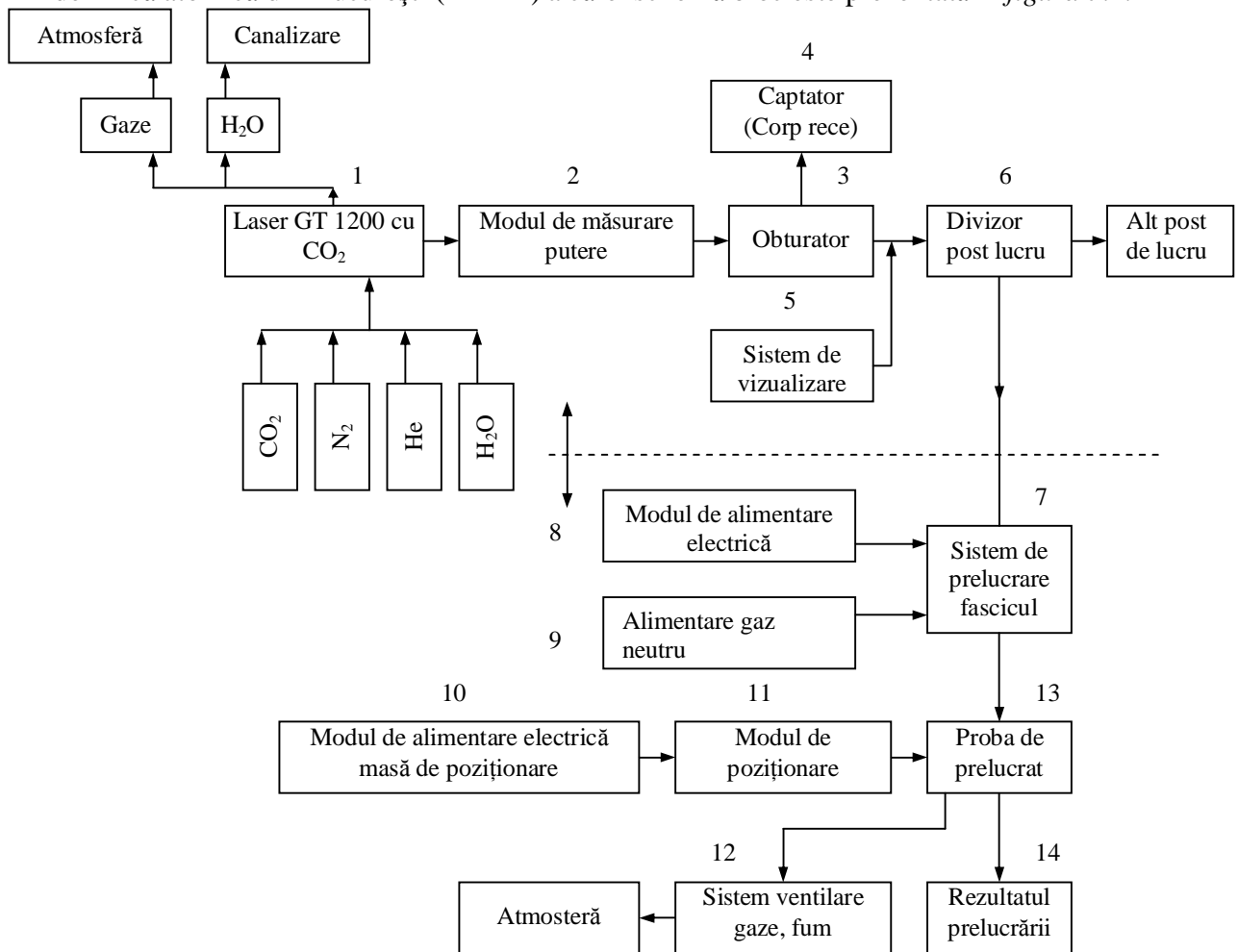


Figura 7.4. Schema bloc a instalației laser cu CO₂ GT 1200, de mare putere, București

1. Sursa laser

Sursa laser este un laser GT 1200 integrat într-un sistem multipost care funcționează în regim continuu. Sistemul de recirculare gaze active, sistemul de răcire, descărcarea și electrozii (anod A și catod K) sunt integrate într-o incintă vidată. (Brevete RSR 61729 și 66773)

O astfel de sursă este destinată echipării instalațiilor de debitare, sudură și tratament termic cu laser. Avantajele utilizării acestei surse laser sunt multiple dar cele mai importante sunt: ZIT redus și faptul că nu are contact mecanic cu obiectul de prelucrat.

Caracteristicile tehnice ale instalației sunt:

▪ Putere maximă laser	1200 W
▪ Dimetru maxim fascicul	30 mm
▪ Divergență maximă	5 mrad
▪ Stabilitate putere	± 7%
▪ Alimentare electrică	3x380V; 50 Hz.
▪ Apă de răcire	
➤ Debit	15 l/min
➤ Temperatura maximă	22°C
➤ Presiune minimă	3 bar
▪ Consum gaze	
➤ CO ₂	0,015 m ³ /h
➤ N ₂	0,1 m ³ /h
➤ He	0,15 m ³ /h
▪ Presiune alimentare gaze de lucru	2,5-3 bar
▪ Temperatură mediu ambiant	5-40°C
▪ Gabarit	1920x860x1650 mm
▪ Masă	1350 kg

2. Modul de măsurare

În *figura 7.5* este prezentată schema instalației de măsurare a puterii laser în timpul prelucrării. Conform acesteia se poate observa că pe bara rotitoare din inox, lată de circa 5 mm, se reflectă aproximativ 1% din puterea fasciculului laser pe o lentilă de

focalizare și prin încălzirea discului radiometru se generează o tensiune de ordinul microvolților care este prelucrată de blocul electronic într-un semnal electric de maxim 100 mV, măsurat cu aparatul de măsură. Întregul dispozitiv servește la controlul parametrului putere laser în timpul prelucrării pentru obținerea reproductibilității prelucrării.

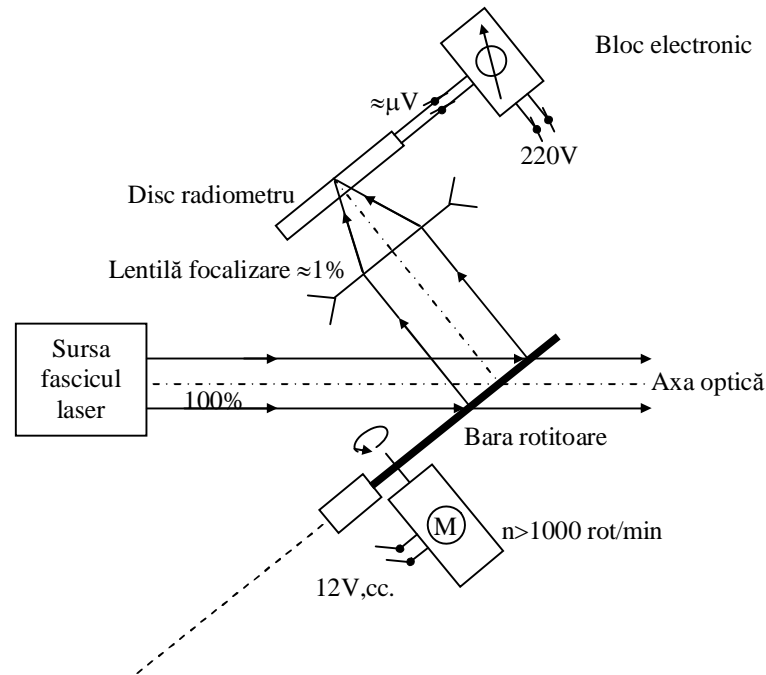


Figura 7.5. Instalația de măsurare a puterii laser în timpul prelucrării

3. Observator

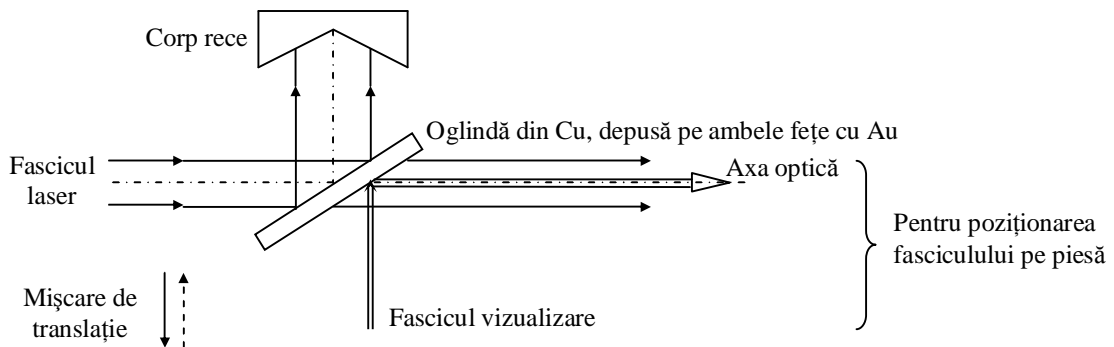


Figura 7.6. Modul de poziționare al fasciculului laser pe obiectul de prelucrat

Observatorul este alcătuit din corpul rece și oglinda de reflecție.

- Corpul rece, când fasciculul este deviat, disipează energia fasciculului prin apa de răcire.

▪ Oglinda de reflexie este din cupru cu depunere de aur pe ambele fețe. Aceasta are două poziții de lucru executând o mișcare de translație:

- 1) deviază fasciculul laser pe corpul rece și transmite fasciculul de vizualizare spre probă;
- 2) retrasă, lasă liberă trecerea fasciculului spre probă.

4. Corpul rece

Corpul rece este o piesă din AlMg cu o suprafață interioară conică, prin care circulă apă de răcire. Fasciculul laser obținut de la sursa laser este dirijat prin intermediul unei oglinzi către corpul rece care elimină din sistem energia fasciculului laser transformată în căldură.

5. Sistemul de vizualizare

Sistemul de vizualizare este reprezentat de o diodă laser de 5mW/12Vcc, care are rolul de a face ca fasciculul laser să devină vizibil pentru o bună poziționare a acestuia pe piesă înainte de prelucrare.

6. Divizor post de lucru

Instalația așa cum este ea prezentată este utilă unor aplicații multiple fiind o instalație multipost. În acest caz s-a folosit doar un singur post de lucru, acesta fiind suficient prelucrărilor propuse. Divizorul postului de lucru este compus dintr-o oglindă de Cu cu depunere de Au pe o singură față.

7. Sistem de prelucrare fascicul

Sistemul de prelucrare fascicul conține patru componente distincte:

- a) *Apertură mecanică* prin care se pot elimina circular inele din fasciculul laser, cu diminuarea corespunzătoare a puterii pentru a obține în secțiune un fascicul mai apropiat de monomod. Astfel s-a utilizat o apertură de 18 mm diametru.
- b) *Subansamblul de deviere la 90°* este un subansamblu cu posibilități de reglare atât a unghiului de 90° cât și a alinierii oglinzii și poziționării subansamblului față de centrul fasciculului în axa optică.
- c) *Capul de focalizare*, care servește ca suport pentru lentilele de focalizare se poate deplasa pentru alinierea cu axa optică. Are o cavitate pentru gazul neutru, acesta intrând în zona în care se află lentila pentru a asigura răcirea acesteia, urmând să fie

evacuat prin duză și împiedicând astfel pătrunderea materialului vaporizat la lentila de focalizare.

- d) *Chopper*, pentru obținerea unui fascicul discontinuu în impulsuri, acționat de un motor electric de curent continuu de turație variabilă prin tensiunea de alimentare. Discul este realizat pentru două variante de funcționare și anume: cu decupare periferică $2 \times 90^\circ$ și de $2 \times 45^\circ$, schimbându-se în funcție de necesități.

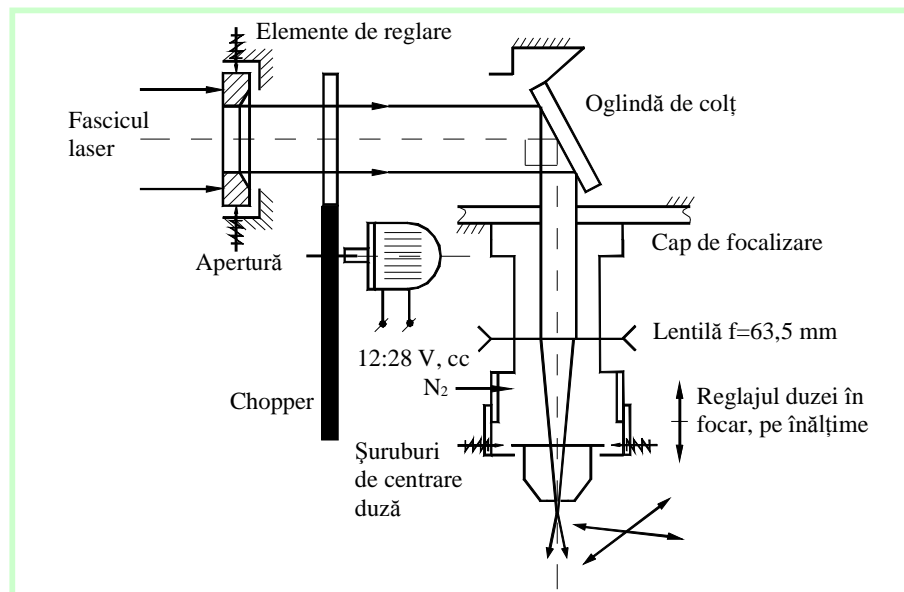


Figura 7.7. Sistemul de prelucrare cu fascicul laser

8. Modul de alimentare electrică chopper

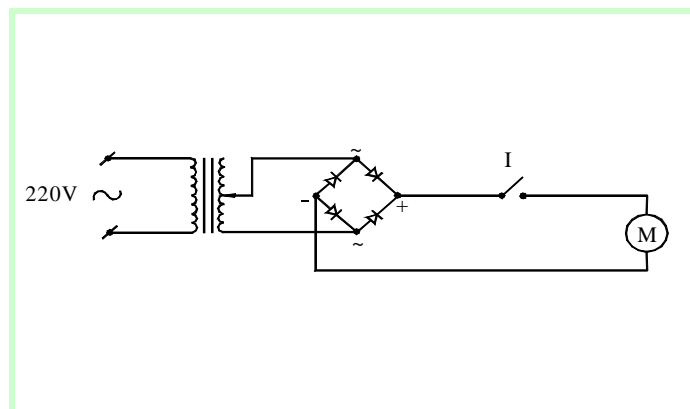


Figura 7.8. Modul de alimentare electrică a chopper-ului

Chopperul este alimentat la 220 V c.a. Un autotransformator ATR-10 asigură obținerea unei tensiuni dorite 0-220 V c.a., care este redresat de o punte - 20 PMU.

Prin întrerupătorul I este comandată rotirea motorului.

9. Alimentare gaz neutru, N₂

Capul de focalizare este alimentat cu N₂ de la o butelie și printr-un reductor de presiune se controlează presiunea de alimentare, care nu depășește din cauze de rezistență, 1,5 bari.

10. Modul de alimentare electrică a mesei de poziționare

Sistemul de alimentare electrică pentru poziționarea mesei este similar cu cel al chopperului, dar completat cu comutatorul de sens I_s, care schimbă sensul de deplasare al mesei.

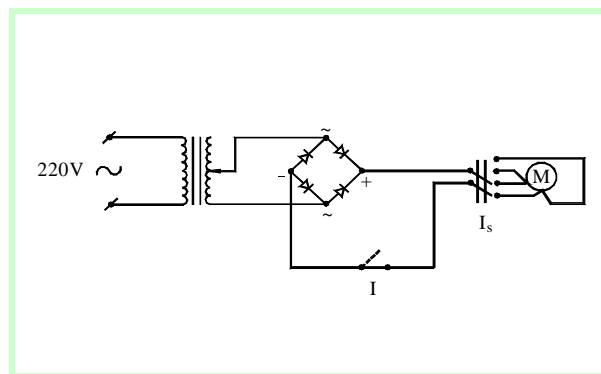


Figura 7.9. Modul de alimentare electrică a mesei de poziționare

11. Modul de poziționare

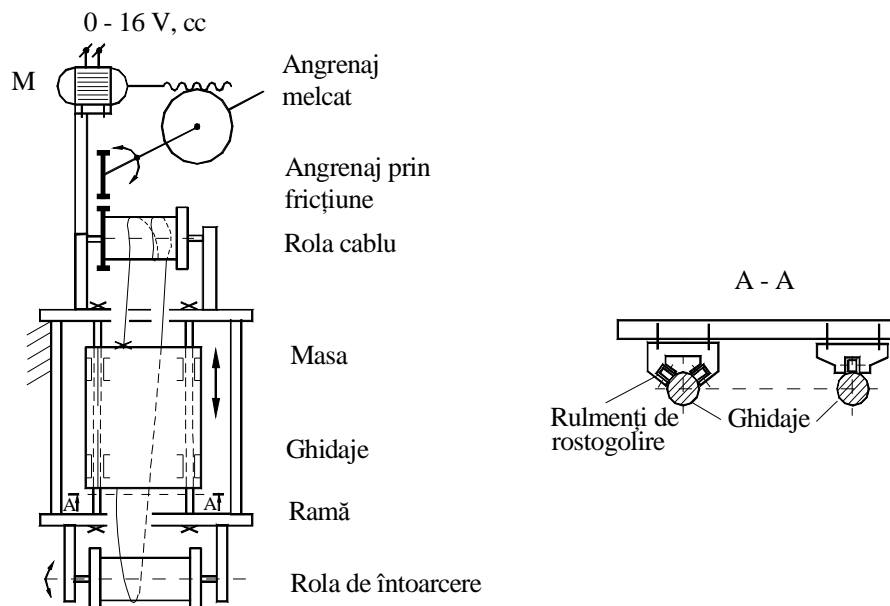


Figura 7.10. Sistem de poziționare piesă pe masa de lucru

O masă cu dimensiunile 200x200 mm se deplasează rectiliniu pe două ghidaje cilindrice, antrenată de un motor electric de curent continuu cu turație variabilă prin tensiunea de alimentare. Viteza de deplasare este 20-200 mm/s. Sensul de deplasare se schimbă în funcție de comandă.

12. Sistem de ventilație gaze-fum

Ventilatorul alimentat cu o tensiune de 220 V c.a., elimină podusele nocive ale prelucrărilor. Acesta funcționează continuu în timpul prelucrărilor.

13. Pregătirea instalației pentru lucru

- 1) Se reglează masa laser, se ia amprenta fasciculului pe suport de lemn, se reglează rezonatorul dacă este cazul. Pentru a obține un fascicul fezabil scopului propus în timpul pregătirii am înlocuit oglinda plană a rezonatorului cu o oglindă cu R 20 m și am introdus o apertură care a eliminat zonele marginale care produceau deformarea fasciculului în secțiune (spre pătrat).
- 2) S-a aliniat cu axa optică și se verifică sistemul de vizualizare.
- 3) Se reglează sistemul de prelucrare al fasciculului:
 - se centrează apertura
 - se aliniază oglinda de colț cu axa optică și se fixează
 - se reglează telescopul capul de focalizare pe înălțime și se centrează duza.
- 4) Se probează mișcarea mesei deplasabile și se reglează tensiunile, vitezele, sensul, înălțimea probei la duză (prin calcul).
- 5) Se reglează presiunea N₂.

14. Modul de lucru

1. Se poziționează proba prin vizualizare
2. Se alimentează capul de focalizare cu N₂
3. Se pornește chopperul doar dacă este cazul (regim pulsant)
4. Se introduce fasciculul
5. Se deplasează proba (doar pentru tăiere)
6. Se oprește masa după obturarea fasciculului
7. Se scoate proba și se montează alta
8. Se deplasează masa în sens invers și se poziționează sub duză
9. Se reia ciclul.

C. Instalația laser de prelucrare cu CO₂ (Franța)

Deoarece la momentul în care s-a ajuns la posibilitatea de a prelucra câteva sorturi de sticlă optică în Franța exista deja un anume bagaj de cunoștințe în ceea ce privește prelucrabilitatea acestor materiale, piesele au fost supuse doar prelucrării de găurire cu radiație laser.

Prin amabilitatea cercetătorilor laboratorului *Laser et Traitements des Matériaux (LTm)* al *Université de Bourgogne* din Le Creusot, Franța, prelucrările au fost realizate pe o instalație laser CO₂ TER ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$) cu lungimea de undă variabilă într-un domeniu mic al lungimii de undă 9,3-11,5 μm , ale cărei caracteristici vor fi specificate în cele ce urmează.



Figura 7.11. Instalația laser CO₂ TER, Franța

Caracteristicile tehnice ale instalației sunt:

- | | |
|---------------------------------|-------|
| ▪ Putere medie laser | 300 W |
| ▪ Dimetru de ieșire al fascicul | 1 mm |
| ▪ Durata maximă a impulsului | 5 ms |

- Tensiunea maximă de încărcare a sistemului de pompaj 10 V

Sorturile de sticlă optică (în această situație doar BK7) au fost poziționate prin intermediul unui sistem de poziționare piese (5) pe masa de lucru în comandă numerică (6), care permite deplasarea obiectului de prelucrat după direcțiile x , y și z . De la oscilatorul laser (3) fasciculul laser este transmis perpendicular pe piesa de prelucrat datorită dispozitivelor optice de transmisie și focalizare ale capului de lucru (4) care are posibilitatea de a se deplasa pe direcțiile x și y . Întreaga instalație este prevăzută cu un bloc de comandă (1) în care este integrat un calculator de la care operatorul poate introduce toate datele de intrare legate de instalația laser.

Produsele degajate în timpul prelucrării sunt captate de sistemul de absorbție gaze de lucru (2) care conține un tub flexibil mobil pentru a putea fi deplasat cu ușurință chiar deasupra zonei de lucru.

De la comanda (7) se poate deplasa masa pe oricare din direcțiile dorite pentru poziționarea corectă a piesei de prelucrat.

7.1.1.3. Aparate de măsură și control

Pentru rezultatele obținute în urma prelucrării, piesele au fost analizate pe cele



a)



b)

Figura 7.12. Microscoape optice pentru măsurarea rezultatelor prelucrării

două microscopice optice prezentate în *figura 7.12*, după cum urmează: (a – cu precizie de măsurare 0,01mm) doar pentru piesele studiate pe laserul Nd-sticlă, (a) și (b) pentru piesele prelucrate pe laserul cu CO₂ GT 1200 și respectiv (b – cu precizie de măsurare 0,0013 mm) pentru piesele prelucrate pe laserul cu CO₂ TER.

7.1.2. Obiectivele cercetării experimentale

7.1.2.1. Stabilirea factorilor de influență (FI) și a funcțiilor obiectiv (FO) la prelucrarea prin găurire cu laser a sorturilor de sticlă optică

O etapă importantă în cercetarea experimentală este aceea în care se stabilesc conform obiectivului final factorii de influență și funcțiile obiectiv urmărite în procesul de prelucrare. Deoarece se pune problema prelucrării materialelor optice transparente cu diferite lungimi de undă ale radiației laser (instalații laser diferite), în cele ce urmează, se propune gruparea într-o manieră originală a factorilor de influență și a funcțiilor obiectiv într-un tabel specific fiecărui proces studiat.

a) cu instalația laser Nd-sticlă ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$)

Deoarece probabilitatea ca aceste materiale să poată fi prelucrate cu o radiație de lungime de undă mică este relativ redusă funcția de răspuns urmărită va fi tocmai prelucrabilitatea materialului în urma interacțiunii acestuia cu radiația laser.

Tabelul 7.2. Factorii de influență (FI) și funcțiile obiectiv (FO) stabiliți la prelucrarea prin găurire a sorturilor de sticlă cu instalația laser Nd-sticlă

FI		UM	FO		UM
A ₁	- Sortul de sticlă (BK7, SF5, TF101)	-	Y _{A1}	Prelucrabilitate sort	-
A ₂	- grosimea sticlei (1; 1,5; 2; 3)	mm			
A ₃	- rugozitatea materialului (Ra ₁ =0,02; Ra ₂ =0,57; Ra ₃ =1,12.)	μm			
A ₄	- stratul de acoperire (grafit, PVC, aliaj Ag)	-			
A ₅	- suprafața pe care acționează fasciculul laser (S ₁ , S ₂)	-			
A ₆	- intensitatea radiației laser (I)	W/cm ²			
A ₇	- tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj (U)	V			
A ₈	- poziția planului de focalizare (0; 0,5; 1; 0,75; 1,5; 2; 3)	mm			
A ₉	- număr impulsuri (n)	-			

Ținându-se cont de toți acești factori au fost realizate experimentele necesare determinării prelucrabilității acestor materiale, rezultatele experimentale fiind prezentate în subcapitolul 7.3.

b) cu instalația laser GT 1200 ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)

În aceeași manieră originală de punere a problemei s-au stabilit și parametrii legați de instalația laser GT 1200 utilizată precum și de materialele optice prelucrate, urmărindu-se câteva funcții obiectiv considerate importante pentru acest proces. Se remarcă faptul că pe lângă sorturile de sticlă optică special abordate în această teză de doctorat s-au făcut încercări și pe alte materiale optice de tipul: PYREX, TEMPAX și sticle pentru condensatori. Aceste materiale optice însă, nu au fost luate în considerare în studiul final ci au constituit date esențiale în evaluarea corespunzătoare a parametrilor de intrare în proces. Acești parametri vor fi grupați în *tabelul 7.3*.

*Tabelul 7.3. FI și FO stabiliți la prelucrarea sorturilor de sticlă
cu instalația laser CO₂ – GT 1200*

FI		UM	FO		UM
B₁	- sortul de sticlă (BK7, SF5, TF101, tub PYREX, TEMPAX, sticlă pentru condensatori)	-	Y_{B1}	- abaterea de la circularitate a alezajului obținut	mm
B₂	- grosimea sticlei (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 5)	mm	Y_{B2}	- abaterea de la cilindricitate a alezajului obținut	-
B₃	- rugozitatea materialului (Ra ₁ =0,02; Ra ₂ =0,57; Ra ₃ =1,12.)	μm	Y_{B3}	- transmitanța în ZIT	%
B₄	- tipul stratului de acoperire (grafit, PVC, aliaj Ag)	-	Y_{B4}	- calitatea tăieturii	-
B₅	- suprafața pe care acționează fasciculul laser (S ₁ , S ₂)	-	Y_{B5}	- lățimea tăieturii	mm
B₆	- puterea radiației laser (P)	W	Y_{B6}	- paralelismul tăieturii	-
B₇	- tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj (U)	V			
B₈	- distanța focală – f (26; 27; 28; 28,5; 29; 30)	mm			
B₉	- presiune gaz de lucru (N ₂) (0,07; 0,08; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8.)	atm			
B₁₀	- modul de operare (continuu, chopper 1/2, chopper 1/4)	-			
B₁₁	- durata de perforare a piesei	s			

După cum se observă din tabelul de mai sus într-o primă fază s-a urmărit prelucrarea sorturilor de sticlă optică atât prin procedeul de tăiere laser precum și prin

găurire, la primul procedeu renunțându-se în urma concluziilor obținute după prelucrare (a se vedea subcapitolul 7.3).

c) cu instalația laser CO₂ TER ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)

În această ultimă situație s-a pus problema prelucrării cu radiație laser a sortului de sticlă BK7 parametrii instalației laser fiind diferiți de cei de la punctul b). De această dată materialul optic nu a mai fost acoperit cu straturi absorbante sau reflectante, cantitatea de energie absorbită necesară amorsării radiației fiind suficient de mare pentru declanșarea procesului de prelucrare. Materialul a fost supus doar prelucrării prin găurire cu radiație laser deoarece în cazul prelucrării prin tăiere o densitate mare de energie ar fi dus la fisurarea și chiar distrugerea în timp a eșantionului, iar o densitate mică de energie nu ar fi permis îndepărtarea corespunzătoare a materialului topit din zona influențată termic.

Astfel parametrii de intrare și ieșire au fost grupați pentru acest proces de prelucrare conform tabelului 7.4.

Tabelul 7.4. FI și FO stabiliți la prelucrarea sorturilor de sticlă cu instalația laser CO₂ TER

FI		UM	FO		UM
C ₁	- sortul de sticlă BK7	-	Y _{C1}	- abaterea de la	mm
C ₂	- grosimea sticlei (1 mm)	mm		circularitate a	
C ₃	- rugozitatea materialului (Ra ₁ =0,02; Ra ₂ =0,57.)	μm	Y _{C2}	- abaterea de la	-
C ₄	- suprafața pe care acționează fasciculul laser (S ₁ , S ₂)	-		cilindricitate a	
C ₅	- puterea radiației laser (P)	W	Y _{C3}	- transmitanța în	%
C ₆	- frecvența (Hz)	Hz		ZIT	
C ₇	- intensitatea curentului flash (I)	A			
C ₈	- debitul gazului de lucru (aer comprimat) (5; 10; 15)	dm ³ /min			
C ₉	- timpul de acționare al FL T _{tr}	s			
C ₁₀	(0,4; 0,7; 1)	mm			
	- poziția planului focal față de piesă (-1; 0; 1)				

7.1.2.2. Alte obiective urmărite

Așadar, pentru sticlele optice prelucrate cu laserul Nd-sticlă, conform factorilor de influență aleși, s-a urmărit ca funcție obiectiv – prelucrabilitatea acestor materiale. Astfel,

la microscopul (a) s-a stabilit în ce măsură au fost perforate eşantioanele în urma procesului de prelucrare prin găurire cu radiație laser. Deoarece, datorită intensității radiației laser și a compatibilității dintre materialele optice și radiație, în multe cazuri prelucrabilitatea a fost scăzută, pe suprafața S_1 a pieselor s-a depus un strat nanometric, absorbant sau reflectant, cu scopul dozării corespunzătoare în zona de lucru a densității de energie necesare declanșării prelucrării. În acest caz, s-a putut face doar o analiză calitativă a prelucrării, prin atribuirea unor valori fizice care să ateste un anumit grad de prelucrabilitate vizualizat microscopic.

În urma prelucrărilor efectuate pe laserul cu Nd-sticlă s-au identificat și ordonat factorii de influență necesari, conform importanței lor în procesul de prelucrare. Din aceste considerente pe laserul cu CO_2 GT 1200, studiul a fost realizat atât pentru debitare cât și pentru găurire. Astfel, în cazul debitării observațiile sunt făcute mai mult la nivel macroscopic (acest procedeu de prelucrare ridicând unele probleme suplimentare, care vor fi amintite în subcapitolul 7.3), găurirea cu radiație laser a sticlelor optice fiind studiată microscopic. Funcțiile de răspuns urmărite în acest proces au fost abaterea de la circularitate și cea de la cilindricitate (prin valori măsurate cu ajutorul microscopului) dar și factorii calitativi legați de aspectul zonei influențate termic și calitatea alezajului prelucrat.

Elementele măsurate au fost:

- D_{max} – diametrul maxim de intrare al alezajului
- D_{min} – diametrul minim de intrare al alezajului
- d_{max} – diametrul maxim de ieșire al alezajului
- d_{min} – diametrul minim de ieșire al alezajului

Conform figurii 7.13, s-au calculat:

- Abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă

$$y_1 = \frac{D_{max} - D_{min}}{2} \quad [mm] \quad (7.1)$$

- Abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă

$$y_2 = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} \quad [mm] \quad (7.2)$$

- Abaterea de la cilindricitate a volumului cilindric prelucrat în piesă

$$y_3 = 1 - \frac{\frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}}{\frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}} = 1 - \frac{d_{\max} + d_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad [-] \quad (7.3)$$

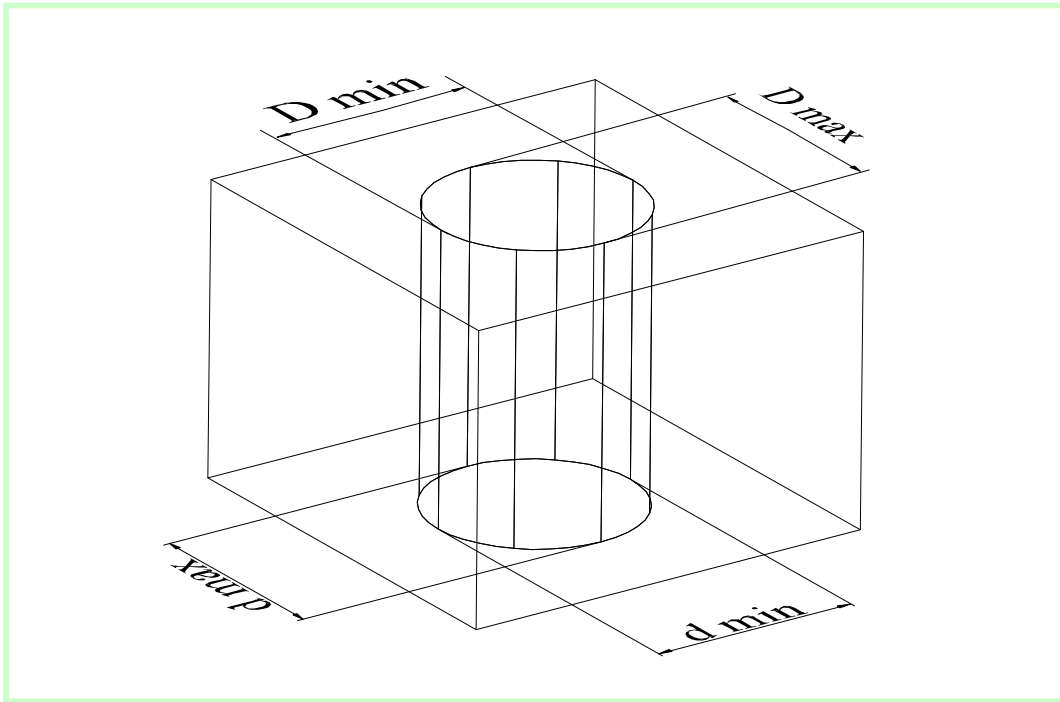


Figura 7.13. Elementele măsurate cu microscopul optic

Sorturile de sticlă optică prelucrate pe instalația laser cu CO₂ TER, au fost analizate cu microscopul optic (b) după același principiu ca la piesele prelucrate cu laserul CO₂ GT 1200. Eșantioanele din sticlă optică transparentă BK7 de rugozitate Ra₁= 0,02 μm au fost supuse doar găuririi cu radiație laser de λ= 10,6 μm.

7.2. Obiectivele și condițiile experimentale la prelucrarea prin marcarea cu radiație laser a polimerilor optici

7.2.1. Condițiile cercetării experimentale

Polimerii optici parțial transparenți au fost prelucrați cu radiație laser utilizându-se procedeul de marcarea cu laser în interiorul sau la suprafața acestora, cu scopul de a înțelege comportamentul lor în tribologie. Totodată, s-a realizat și un studiu comparativ

între prelucrările cu laser efectuate pe sorturile de sticlă optică respectiv, polimeri optici parțial transparenți, deoarece aceștia din urmă, tind să ocupe un loc tot mai important în optică, înlocuind sticlele optice care sunt casante și pot fi ușor distruse. Asemănarea dintre cele două categorii de materiale a făcut ca polimerii optici parțial transparenți să fie cunoscuți și sub denumirea de *sticle organice*, acestea fiind mai rezistente mecanic.

În acest sens, materialele prelucrate au fost PMMA și PC, doi polimeri optici transparenți pentru spectrul vizibil, asupra cărora s-a acționat cu radiație laser Nd-YAG ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$), fără ca suprafața de interacțiune fascicul laser – material să fi fost tratată înaintea prelucrării pentru o mai bună amorsare a radiației. Pentru ambele materiale s-au luat în calcul toți parametrii legați de materialul în sine dar și cei ai instalației laser de prelucrare.

Factorii de influență importanți pentru materiale prelucrate sunt în special cei care țin de proprietățile optice ale polimerilor: indici de refracție (vezi *figura 7.14* pentru PMMA), coeficientul lui Abbe, coeficientul de transmisie a luminii, dar și de cele termice: temperatura de tranziție vitroasă, temperatura de utilizare, etc.

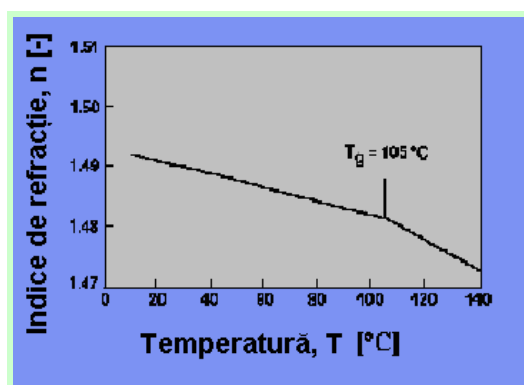


Figura. 7.14. Indicele de refracție în funcție de temperatură pentru PMMA la o lungime de undă de $\lambda=589, \text{nm}$ (conform Osswald et Menges)

7.2.1.1. Materiale

Materialele analizate au fost din categoria polimerilor amorfi sintetici, heterocatenari (cu catene ramificate), termoplastici, transparenți, furnizați sub formă de bară dreptunghiulară (PMMA – polimetacrilat de metil) sau plăci (PC - policarbonat), din care au fost prelucrate eșantioane paralelipipedice (12x30x30 mm - PC) sau cubice (50x50x50 mm - PMMA). Astfel, parametrii corespunzători materialelor studiate luați în considerare pentru procesul de prelucrare sunt grupați în următorul tabel:

Tabelul 7.5. Proprietățile celor două materiale termoplastice [63], [81]

Material	Proprietățile materialului prelucrat					
	Densitate [g/cm ³]	Indice de refracție [-]	Coef. Abbe [-]	Transmisia luminii [%]	Coeficient de dilatare liniară α [1/°C]	T _v [°C]
PC	1,18	1,491	57,2	88	$7,0 \times 10^{-5}$	150
PMMA	1,20	1,583	34,5	92	$6,5 \times 10^{-5}$	105

în care:

- T_v – temperatura de vitrifiere.

Se poate remarca conform *figurii 7.14.*, că indicele de refracție n scade odată cu creșterea temperaturii, motiv pentru care se poate avea în vedere modificarea caracteristicilor optice ale celor două materiale prin încălzirea controlată a pieselor pentru o mai bună amorsare a densității de energie laser necesare prelucrării. În acest mod, prelucrarea materialelor optice s-ar realiza după ce în prealabil piesele ar fi încălzite la o temperatură constantă care să reducă șocul termic produs de prelucrarea cu radiație laser. Totuși, acest procedeu implică condiții suplimentare de lucru (fiind necesar un cuptor și aparate de reglare și menținere a temperaturii), fapt pentru care, prelucrarea pieselor în stare caldă nu va constitui subiectul acestei teze ci va fi o rampă de lansare pentru alte studii sau teze de doctorat.

În cele ce urmează, cei doi polimeri vor fi tratați separat având în vedere că în urma interacțiunii radiație laser-material, cu toate că principiul de prelucrare a fost același, aceștia au avut comportament diferit.

Așadar, semifabricatul din PMMA a fost obținut prin polimerizare în topitură, eșantioanele prezentând patru suprafețe transparente pentru radiația vizibilă și două suprafețe mate rezultate din bara dreptunghiulară în zona de tăiere cu fierăstrăul electric. Fiecare cub PMMA a fost supus radiației laser Nd-YAG ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$) care a acționat normal pe una din fețele transparente în vederea prelucrării prin marcarea. În acest scop, capul de lucru al fasciculului laser a fost poziționat ca în *figura 7.15.*, focalizarea făcându-se în mijlocul piesei (la 25 mm față de baza de poziționare a piesei pe masa de lucru) astfel încât la o acționare a fasciculului laser să se formeze o linie prelucrată (pe adâncimea piesei), alcătuită dintr-o succesiune de puncte numite în continuare plane de clivaj.

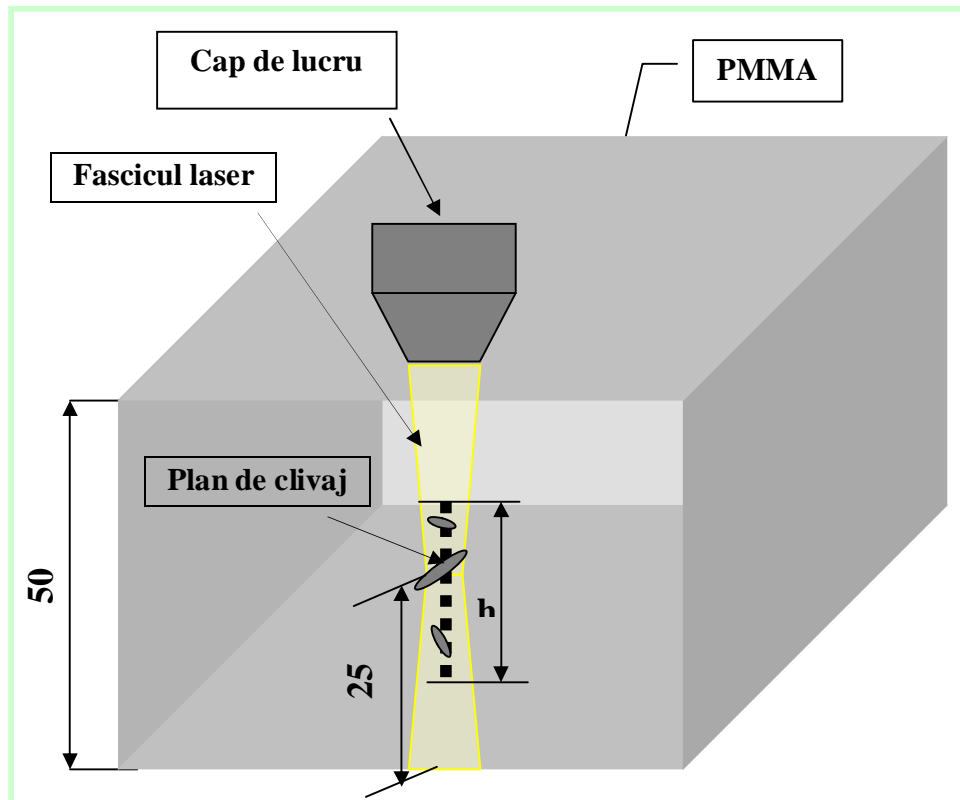


Figura 7.15. Eșantionul de PMMA și modul de prelucrare cu radiația laser

Spre deosebire de PMMA, semifabricatul din PC a fost obținut prin extrudare, eșantioanele prezentând și în acest caz, patru suprafețe transparente pentru radiația vizibilă și două suprafețe mate rezultate din bara dreptunghiulară în zona de tăiere cu fierăstrăul electric. Fiecare eșantion de PC a fost supus aceleiași radiații laser Nd-YAG ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$) care a acționat normal pe una din fețele transparente în vederea prelucrării prin marcarea. Capul de lucru al fascicului laser a fost poziționat ca în figura 7.16., focalizarea fiind variabilă în funcție de poziția planului de focalizare h_f (de la -4 mm la +20 mm) astfel încât la o acționare a fascicului laser să se formeze o suprafață tronconică de prelucrare (cu secțiunea A-A) de înălțime h .

Deoarece s-a avut în vedere și prelucrarea complexă a acestui material care a avut o reacție mai bună la interacțiunea cu radiația laser, s-a studiat și marcarea după direcții liniare, caz în care fascicului laser i s-a impus o anumită viteză de deplasare corespunzător căreia în interiorul PC s-a obținut o suprafață plană prelucrată, de lungime L determinată (figura 7.17).

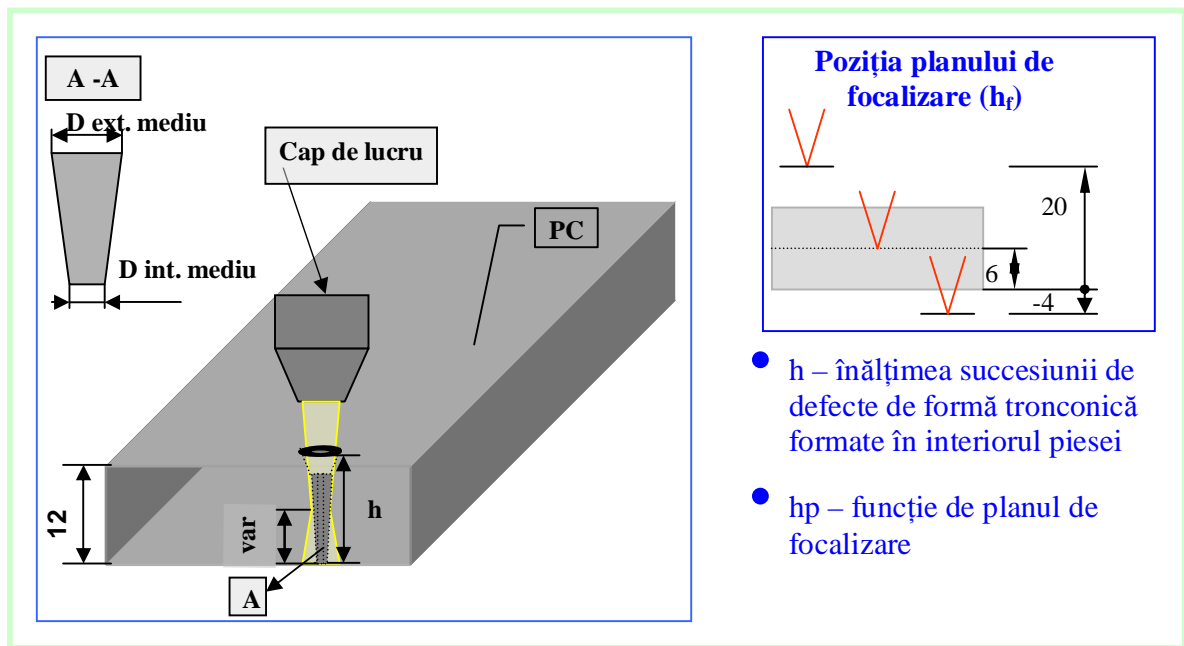


Figura 7.16. Eșantionul de PC și modul de prelucrare cu radiația laser la marcarea punctiformă

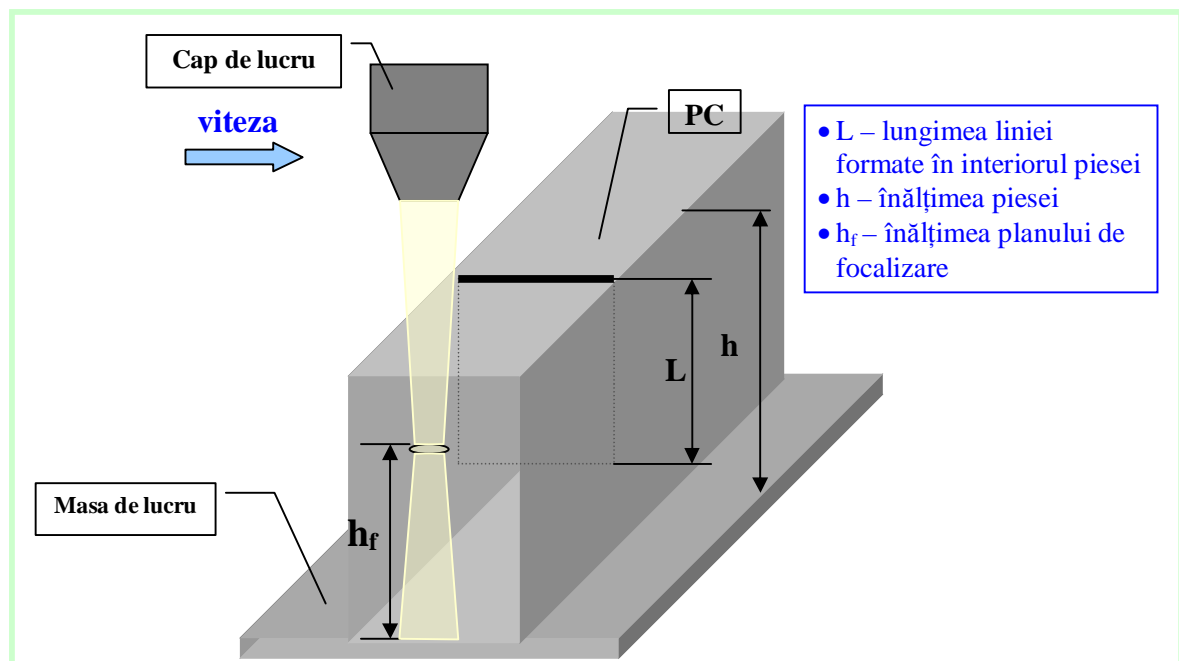


Figura 7.17. Eșantionul de PC și modul de prelucrare cu radiația laser la marcarea liniară

7.2.1.2. Instalația laser pentru marcarea (Franța)

Sursa laser utilizată a fost un laser de marcarea Nd-YAG (tip SLM40D – figura 7.18.) cu lungime de undă $\lambda=1,06 \mu\text{m}$, de proveniență germană, realizat de firma Rofin Baasel Lasertech. Instalația laser permitea operarea în regim de lucru continuu, pulsant sau Q-switch, distribuția modală fiind multimod. Pentru o distribuție modală corectată (aproximativ gaussiană) se putea utiliza o gamă largă de diafragme cu diametre de 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 4 mm. Deoarece puterea fasciculului laser scade odată cu micșorarea diametrului diafragmei, s-a hotărât folosirea diafragmei de 4 mm care furniza suficientă energie pentru a realiza marcarea în interiorul sau la suprafața pieselor.

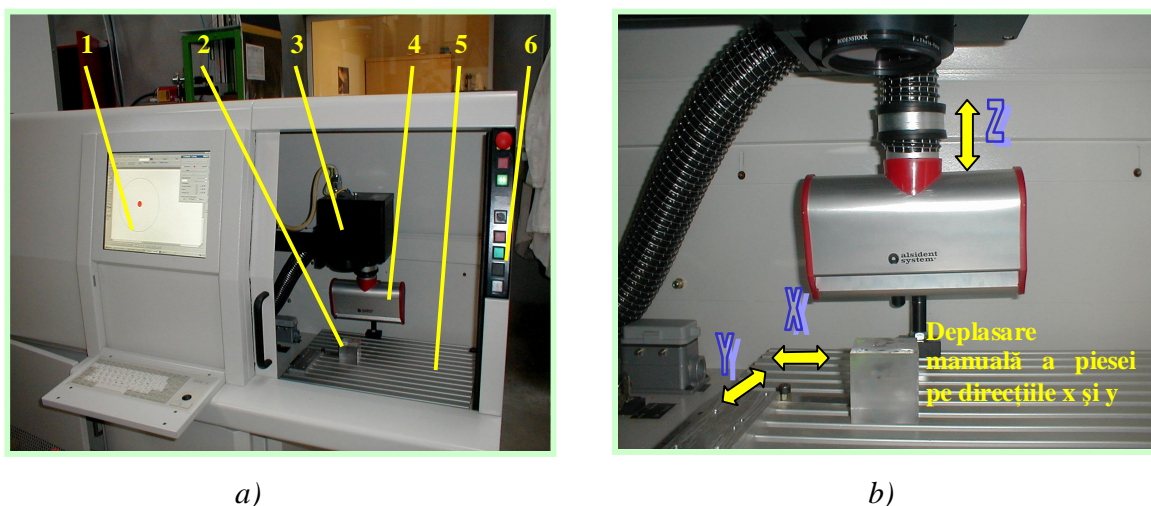


Figura 7.18. Sursa laser utilizată la marcarea polimerilor

Unitatea de lucru (figura 7.18. a) era echipată cu un sistem de asistare computerizată a procesului de prelucrare (1) de la care se setau toți parametrii legați de instalația laser precum și modul de deplasare al fasciculului laser în timpul prelucrării (deplasare pe contur specificat). Piesele optice (2) poziționate pe masa de lucru (5) erau deplasate manual pe direcțiile x și y (figura 7.18. b), astfel încât capul de lucru (3) să direcționeze fasciculul normal pe suprafața piesei în orice moment. Zona de acțiune a fasciculului laser pe suprafața piesei se desfășura pe o suprafață circulară de diametru 50 mm, capul de lucru fiind alcătuit din două oglinzi rotative care permiteau direcționarea spotului laser pe direcțiile x și y pentru acoperirea întregii zone de acțiune. Dezavantajul reglării poziției spotului laser cu ajutorul oglinzilor rotative constă în imposibilitatea fasciculului laser de a acționa normal pe suprafața piesei. Poziția planului focal în piesă a

fost reglată prin focalizarea fascicului laser pe direcția z cu ajutorul unei lentile cu distanță focală 200 mm. Pentru evacuarea gazelor produse în zona de lucru instalația a fost prevăzută cu un sistem de aspirație al gazelor (4). Prelucrarea propriu-zisă se obține automat prin închiderea ușii de protecție cu ecran protector sau manual prin acționarea butoanelor din panoul de comandă (6).

Valorile maxime și minime ale parametrilor instalației laser de marcarea a polimerilor optici sunt grupați în *tabelul 7.6.* pentru ambele tipuri de prelucrări punctiformă *a)* și respectiv liniară *b).*

Tabelul 7.6. Parametrii instalației laser pentru marcarea polimerilor optici

Parametrii	UM	Min.	Max.
Intensitate	A	12	50
Frecvență	Hz	200	30000
Nr. Impulsuri	Imp./punct	1	1000
Putere medie	W	0	50
Durata puls	ms	0.01	1

Parametrii	UM	Min.	Max.
Intensitate	A	12	50
Frecvență	Hz	200	30000
Viteză	mm/s	20	1410
Putere medie	W	0	50

a) marcarea punctiformă

b) marcarea liniară

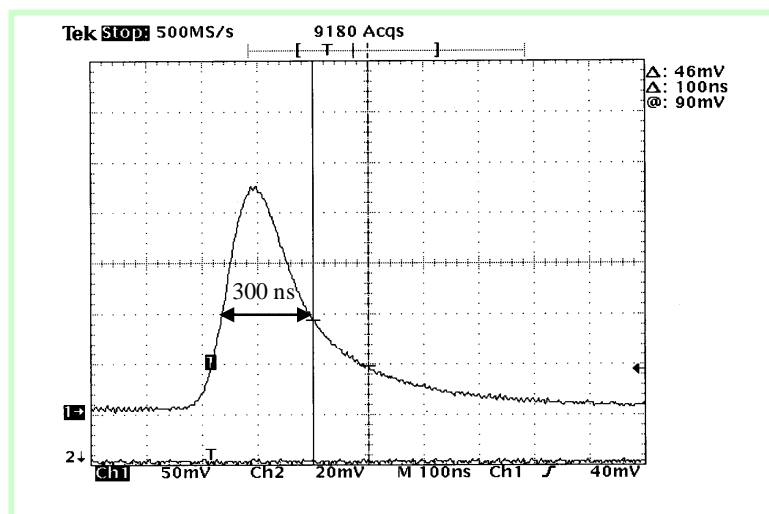


Figura 7.19. Distribuția impulsului laser

Cu ajutorul unui osciloscop s-a măsurat distribuția impulsului laser în funcție de tensiune și frecvență și s-a remarcat că durata impulsului laser rămâne aproximativ constantă la o valoare de 300 ns, chiar dacă valorile celor doi parametri variază.

7.2.1.3. Aparat de măsură și control

În cazul materialelor optice (polimeri) prelucrate pe laserul de marcaj Nd-YAG imaginile au fost obținute de la un microscop electronic (*figura 7.20*) conectat la un computer prin intermediul căruia s-au putut măsura diametrul exterior și interior al zonei prelucrate precum și adâncimea liniei trasate cu radiație laser în policarbonat.



Figura 7.20. Microscopul electronic

7.2.2. Obiectivele cercetării experimentale

Operația de prelucrare prin marcarea a polimerilor analizați, are la bază același principiu ca în cazul găuririi cu radiație laser a sticlelor optice astfel încât, abordarea acestei metode de prelucrare s-a făcut ținându-se cont de rezultatele obținute la găurire. Totuși s-a constatat că pentru polimeri nu au fost necesare nici o putere laser atât de mare și nici lungimi de undă a radiației laser atât de mari, lucru datorat și operațiilor diferite de prelucrare, marcarea fiind mai ușor de realizat.

7.2.2.1. Stabilirea factorilor de influență (FI) și a funcțiilor obiectiv (FO) la prelucrarea prin marcarea cu laser a polimerilor optici

Și în această situație parametrii de intrare în proces au fost atent corelați cu cei de ieșire atât pentru prelucrarea prin marcarea punctiformă cât și la cea liniară. De asemenea, s-au tratat separat cei doi polimeri deoarece aceștia au avut comportament diferit la

interacțiunea radiație laser-material. *Figurile 7.15, 7.16 și 7.17* stau la baza stabilirii corespunzătoare a factorilor de influență care să ducă la realizarea funcțiilor obiectiv alese în cele trei cazuri:

a) Polimetacrilat de metil (PMMA)

În urma cercetărilor efectuate s-a constatat că pentru obținerea unui efect în interiorul PMMA-ului intensitatea curentului electric din dioda de pompaj trebuie să fie peste 45 A. Astfel, pentru experimente s-a păstrat constantă intensitatea $I = 48$ A, modificându-se frecvența impulsurilor și respectiv puterea radiației laser.

Tabelul 7.7. FI și FO stabiliți la marcarea punctiformă cu laser a PMMA

FI		UM	FO		UM
D₁	- frecvența F	Hz	Y_{D1}	Înălțimea liniei prelucrate h	mm
D₂	- puterea medie a radiației P	W			
D₃	- număr impulsuri pe punct (n)	imp/pct.			
D₄	- număr de acționări fasciul laser	-			

De la sistemul de asistare computerizată a procesului de prelucrare (1) (*figura 7.18. a*) se transmite pe suprafața piesei sau în interiorul acesteia un punct de diametru 225 μm care reprezintă pata focală minimă. După interacțiunea fascicul laser-material în interiorul cubului de PMMA se formează normal la suprafața prelucrată o linie alcătuită dintr-o succesiune de defecte punctiforme sau plane, fără a distruge suprafața piesei orientată spre fascicul.

b1) Policarbonat (PC) – prelucrare punctiformă

Pentru acest material studiul s-a dezvoltat pe două direcții, una fiind cea a prelucrării punctiforme (identică ca metodă de prelucrare cu cea de la PMMA) iar cealaltă liniară. Parametrii în primul caz, corespunzători *figurii 7.16*, au fost cei din *tabelul 7.8*.

Tabelul 7.8. FI și FO stabiliți la marcarea punctiformă cu laser a PC

FI		UM	FO		UM
E₁	- frecvența F	Hz	Y_{E1} Y_{E2}	Diametrul mediu exterior D _{ext}	mm
E₂	- puterea medie a radiației P	W		Diametrul mediu interior D _{int}	mm
E₃	- număr impulsuri pe punct (n)	imp/pct.			
E₄	- poziția planului de focalizare h _f	mm			
E₅	- intensitatea curentului flash I	A			

Marcarea punctiformă a policarbonatului s-a făcut atât la suprafața materialului cât și în interiorul acestuia prin reglarea poziției planului de focalizare hf . În urma prelucrării s-a obținut o suprafață tronconică alcătuită din defecte foarte fine (punctiforme), datorate carbonizării materialului în zona influențată termic.

b2) Policarbonat (PC) – prelucrare liniară

La prelucrarea după direcții prestabilite (în cazul de față linii – figura 7.17), pe lângă parametrii de intrare deja cunoscuți au mai fost necesară introducerea unui nou factor – viteza de deplasare a fasciculului laser. În aceste condiții, funcția de răspuns a fost stabilită ca fiind înălțimea liniei prelucrate în profunzimea piesei astfel încât aceasta să se formeze imediat sub suprafața de interacțiune radiație laser-material. Așadar, pentru a păstra marcarea în interiorul policarbonatului nu a fost importantă doar înălțimea liniei prelucrate (care reprezenta FO măsurabilă – tabelul 7.9) ci și aspectul vizual care indica cea mai bună prelucrare în condițiile specificate.

Tabelul 7.9. FI și FO stabiliți la marcarea liniară cu radiație laser a PC

FI		UM	FO		UM
F ₁	- frecvența F	Hz	Y _{F1}	Înălțimea liniei prelucrate în profunzimea piesei - h	mm
F ₂	- puterea medie a radiației P	W			
F ₃	- număr impulsuri pe punct (n)	imp/pct.			
F ₄	- poziția planului de focalizare h _f	mm			
F ₅	- intensitatea curentului flash I	A			
F ₆	- viteza v	mm/s			

7.2.2.2. Alte obiective urmărite

Studiul realizat a dorit să evidențieze pe de-o parte comportamentul celor doi polimeri optici transparenți la interacțiunea lor cu radiația laser și pe de altă parte comportamentul față de sorturile de sticlă optică care constituiau subiectul principal al acestei teze de doctorat. Astfel, în cazul PMMA-ului s-a pus accent pe efectul radiației laser la interacțiunea cu materialul, studiindu-se în principal zona influențată termic și modalitatea de propagare a defectelor în polimer. La PC s-a efectuat o cercetare mai amănunțită datorită faptului că defectele produse în ZIT au fost foarte fine, ceea ce a permis o dezvoltare a acestui procedeu de prelucrare spre operații mai complexe (prelucrare după contur). Aceasta a făcut ca pentru PC să se realizeze și o optimizare a marcării liniare în polimer.

Pentru ambele materiale s-a analizat și repetabilitatea procesului de prelucrare.

7.3. Rezultatele cercetărilor experimentale

7.3.1. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser de prelucrare Nd-Sticlă din Timișoara

După cum s-a mai precizat în această teză de doctorat, cercetările au fost efectuate la întreprinderea A.E.M. Timișoara, pe o instalație laser Nd-sticlă de proveniență chinezească, care funcționa doar în regim de impulsuri, fiind utilizată la prelucrarea prin găurire cu radiație laser a safirelor artificiale.

Pomind de la o idee mai veche a domnului profesor Popovici Vasile [61] și cunoscând faptul că laserul Nd-sticlă a dat rezultate mulțumitoare în cazul prelucrării safirelor, s-a urmărit prelucrarea sticlelor optice prin procedee asemănătoare. În procesul de prelucrare s-au luat în considerare toți factorii de influență A_1 - A_9 tabelul 7.10.

Tabelul 7.10. Factorii de influență pentru prelucrarea cu radiație laser Nd-sticlă

FI	A_1 [-]	A_2 [mm]	A_3 [μ m]	A_4 [-]	A_5 [-]
	$A_{11} = \text{BK7}$ $A_{12} = \text{SF5}$ $A_{13} = \text{TF101}$	$A_{21} = 1$ $A_{22} = 1,5$ $A_{23} = 2$ $A_{24} = 3$	$A_{31} = \text{Ra}_1 = 0,02$ $A_{32} = \text{Ra}_2 = 0,57$ $A_{33} = \text{Ra}_3 = 1,12$	$A_{41} = \text{PVC}$ $A_{42} = \text{aliaj Ag}$ $A_{43} = \text{grafit}$	$A_{51} = S_1$ $A_{52} = S_2$ $A_{53} = S_1 + \text{strat PVC}$ $A_{54} = S_1 + \text{strat aliaj Ag}$ $A_{55} = S_1 + \text{strat grafit}$ $A_{56} = S_2 \rightarrow S_1 + \text{strat PVC}$ $A_{57} = S_2 \rightarrow S_1 + \text{strat aliaj Ag}$ $A_{58} = S_2 \rightarrow S_1 + \text{strat grafit}$

FI	A_6 [A]	A_7 [V]	A_8 [mm]	A_9 [-]
	$A_{61} = 45$ $A_{62} = 55$ $A_{63} = 60$	$A_{71} = 1200$ $A_{72} = 1250$ $A_{73} = 1400$ $A_{74} = 1500$	$A_{81} = 0$ $A_{82} = 0,5$ $A_{83} = 0,75$ $A_{84} = 1$ $A_{85} = 1,5$ $A_{86} = 2$ $A_{87} = 3$	$A_{91} = 2$ $A_{92} = 4$ $A_{93} = 5$ $A_{94} = 6$ $A_{95} = 7$ $A_{96} = 10$

La prelucrarea datelor experimentale s-a ținut cont de suprafața pe care s-a făcut prelucrarea (factorul de influență A_5), astfel S_1 a fost acoperită cu strat absorbant (grafit sau PVC) sau reflectant (aliaj Ag) pe o zonă circulară de rază 10 mm iar S_2 (suprafața opusă) a rămas neacoperită. În aceste condiții prelucrarea a putut fi efectuată de pe:

- suprafața S_1 chiar în zona acoperită,

- suprafața S_2 astfel încât la ieșire fasciculul să se găsească în zona acoperită de pe S_1 ,
- de pe suprafața S_1 sau S_2 în afara zonei acoperite (de pe ambele suprafețe în cazul în care rugozitatea suprafeței S_1 era diferită de rugozitatea suprafeței S_2).

În toate cazurile fasciculul laser a acționat normal pe suprafața supusă prelucrării.

Alți factori de influență au fost: materialul de acoperire A_4 , poziția planului de focalizare în piesă - A_8 , tensiunea A_7 și intensitatea curentului A_6 , grosimea sortului de sticlă A_2 , tipul materialului optic prelucrat (crown sau flint) A_1 și numărul de impulsuri necesare pentru prelucrarea alezajului - A_9 . Tensiunea maximă de încărcare a sistemului de pompaj a fost de 1500 volți iar intensitatea maximă a curentului a fost de 60 amperi.

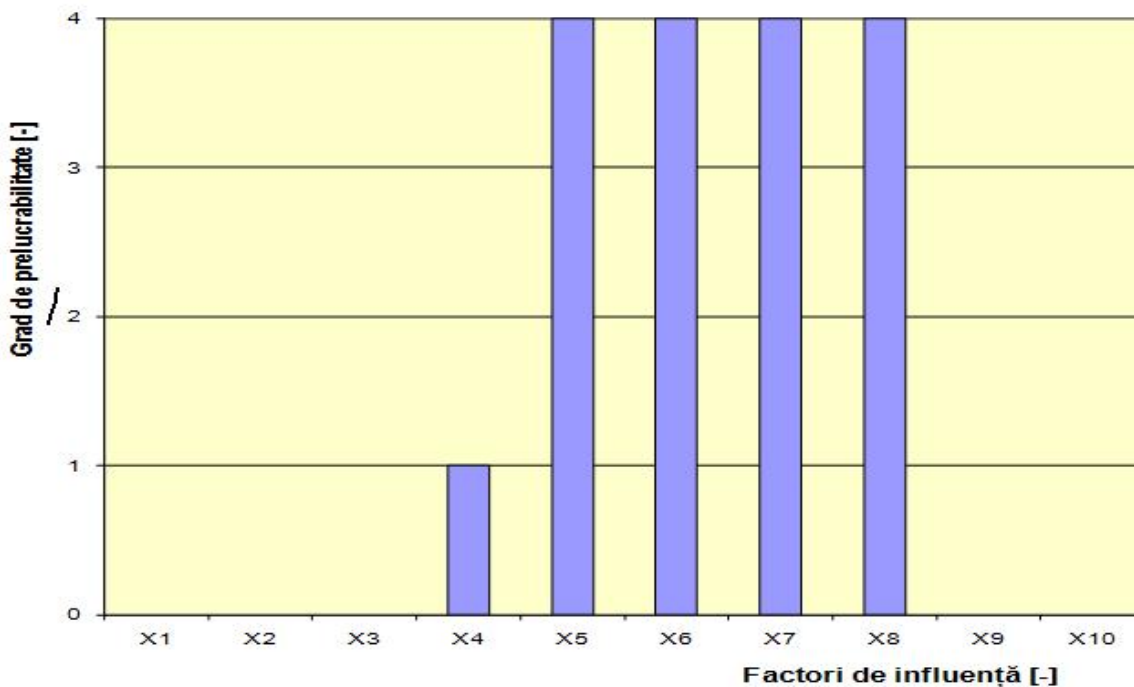
Funcția de răspuns corespunzătoare acestor factori de influență a fost doar prelucrabilitatea materialului supus prelucrării și aceasta deoarece, din cele patru materiale supuse prelucrării doar două au avut efectul scontat, unul din materiale fiind sticla de geam care nu face obiectul acestui studiu de cercetare iar cel de-al doilea sortul BK7. Acestei funcții obiectiv i s-au atribuit următoarele valori fizice:

Tabelul 7.11. Valori fizice atribuite funcției obiectiv

FO	Y_{A1} – prelucrabilitate sort	Valoare fizică atribuită
	Y_{A10} – eșantion neprelucrat	0
	Y_{A11} – eliminare strat depus	1
	Y_{A12} – eliminare strat depus + topire	2
	Y_{A13} – prelucrare parțială	3
	Y_{A14} – stăpungere	4

S-au efectuat circa 125 de încercări dintre care 50 pe sorturi de sticlă de tip crown – BK7, 41 încercări pe sortul de sticlă flint TF101, 33 pe sortul flint SF5 și o încercare pe sticlă ordinară. Materialul dielectric folosit (policlorura de vinil – PVC) și cel metalic - aliajul de Ag (Ag 75%, Cd, Zn), au fost depuse monostrat cu ajutorul unei instalații de depunere a straturilor subțiri în vid - VYP 5, la Universitatea de Vest din Timișoara.

În cazul sortului BK7 de 1 mm grosime pentru care spotul laser este focalizat la suprafață s-a realizat o combinație de factori de influență pentru care prelucrabilitatea acestui sort arată ca în figura 7.21.



și A_{81} (focalizare la suprafața piesei)

Combinarea dintre factori este următoarea:

- X1 – $A_{31} + A_{51}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 , rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_1
- X2 – $A_{32} + A_{51}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 , rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_2
- X3 – $A_{33} + A_{51}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 , rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_3
- X4 – $A_{32} + A_{55}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 pe care se depune un strat de grafit, rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_2
- X5 – $A_{31} + A_{53}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 pe care se depune un strat de PVC, rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_1
- X6 – $A_{31} + A_{56}$ - fasciculul laser acționează de pe suprafața S_2 spre suprafața S_1 care are un strat de PVC, rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_1
- X7 – $A_{32} + A_{53}$ - fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 pe care se depune un strat de PVC, rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_2
- X8 – $A_{32} + A_{56}$ - fasciculul laser acționează de pe suprafața S_2 spre suprafața S_1 care are un strat de PVC, rugozitatea pe ambele suprafețe ale piesei fiind Ra_2
- X9 – $A_{31} + A_{32} + A_{52}$ - fasciculul laser acționează de pe suprafața S_2 de rugozitate Ra_2 pe suprafața S_1 de rugozitate Ra_1

- X10 – A₃₁ + A₃₂ + A₅₁ - fasciculul laser acționează de pe suprafața S₁ de rugozitate Ra₁ pe suprafața S₂ de rugozitate Ra₂

Conform factorilor de influență de mai sus, se remarcă pentru radiația laser cu $\lambda=1,06 \mu\text{m}$, că sorturile de sticlă neacoperite de tip BK7 de grosime 1 mm, indiferent de rugozitatea suprafeței, sunt total transparente. În concluzie prelucrarea nu are loc în aceste condiții. Pentru sorturile de sticlă din același material pe care s-au făcut depuneri de grafit sau PVC, s-a observat în funcție de materialul de acoperire, un anumit grad de prelucrabilitate.

La sticlele optice acoperite cu grafit pelucrabilitatea a fost relativ mică, constatându-se doar o îndepărtare a materialului depus, eșantionul de sticlă nefiind prelucrat. În schimb, pentru sorturile acoperite cu PVC de rugozitate Ra₁ respectiv Ra₂ prelucrabilitatea a fost maximă, alezajele obținute fiind realizate pe toată grosimea materialului. Mai mult, faptul că spotul laser a acționat de pe suprafața S₁ sau S₂ nu a modificat gradul de prelucrabilitate al materialului, acesta rămânând maxim.

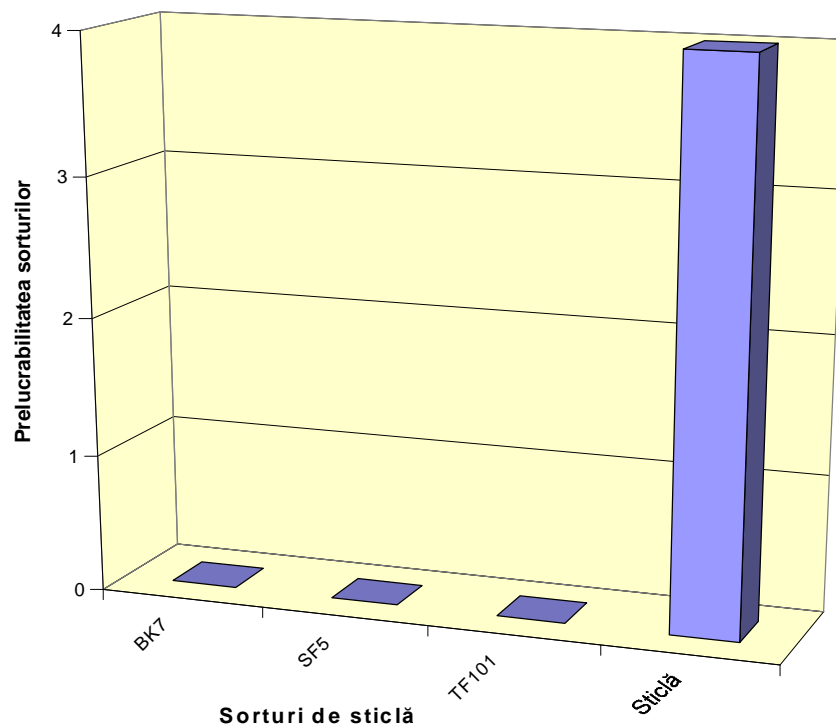


Figura 7.22. Prelucrabilitatea sorturilor de sticlă cu grosimi de până la 3 mm pentru A31(Ra₁), A51 (S₁) și A81 (la suprafața piesei)

În figura 7.22. se remarcă faptul că dintre toate sorturile supuse prelucrării cu radiație laser la care fasciculul acționează de pe suprafața S₁ pe suprafața S₂, în condițiile în care rugozitatea sorturilor pe ambele fețe este Ra₁ iar densitatea de energie

este concentrată la suprafața materialului, doar sticla normală prezintă alezaj în urma prelucrării. Toate celelalte sorturi (BK7, SF5, TF101) sunt transparente pentru lungimea de undă a laserului Nd-sticlă.

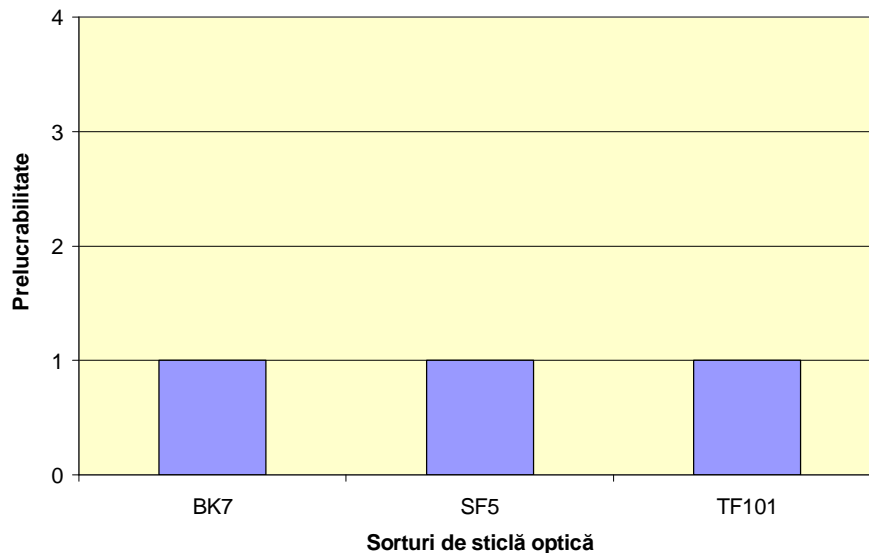


Figura 7.23. Prelucrabilitatea sticlelor optice pentru A31 (Ra_1) și A54 (S_1 +strat aliaj Ag)

Prelucrabilitatea celor trei sorturi de sticlă optică studiate, în cazul în care fasciculul laser acționează normal pe suprafața S_1 de rugozitate Ra_1 pe care s-a depus un strat de aliaj de argint (figura 7.23.), este relativ mică, în această situație obținându-se doar o îndepărtare a stratului depus. Se poate confirma deci că toate aceste materiale sunt transparente pentru radiația laser utilizată.

Dintre cele trei sorturi studiate, o prelucrabilitate relativ bună a avut sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime, dar numai în situația în care acesta a fost acoperit pe suprafața S_1 cu un strat de PVC. Prelucrarea s-a făcut focalizând fasciculul laser pe rând: la suprafața piesei, în piesă (aproximativ mijlocul acesteia) și sub piesă. S-au utilizat eșantioane cu două rugozități diferite (Ra_1 respectiv Ra_2), spotul laser acționând normal fie la suprafața S_1 fie la suprafața S_2 a eșantioanelor.

Conform reprezentării grafice din figura 7.24. când radiația laser acționează la suprafața materialului sau în piesă, prelucrabilitatea eșantioanelor de rugozitate Ra_1 și Ra_2 este maximă indiferent dacă prelucrarea se face de pe suprafața S_1 sau de pe suprafața S_2 . Doar la eșantioanele de rugozitate Ra_2 când densitatea de energie a radiației laser este concentrată sub piesă, se observă o prelucrare parțială a materialului, pentru rugozitatea Ra_1 în aceleași condiții prelucrabilitatea fiind maximă.

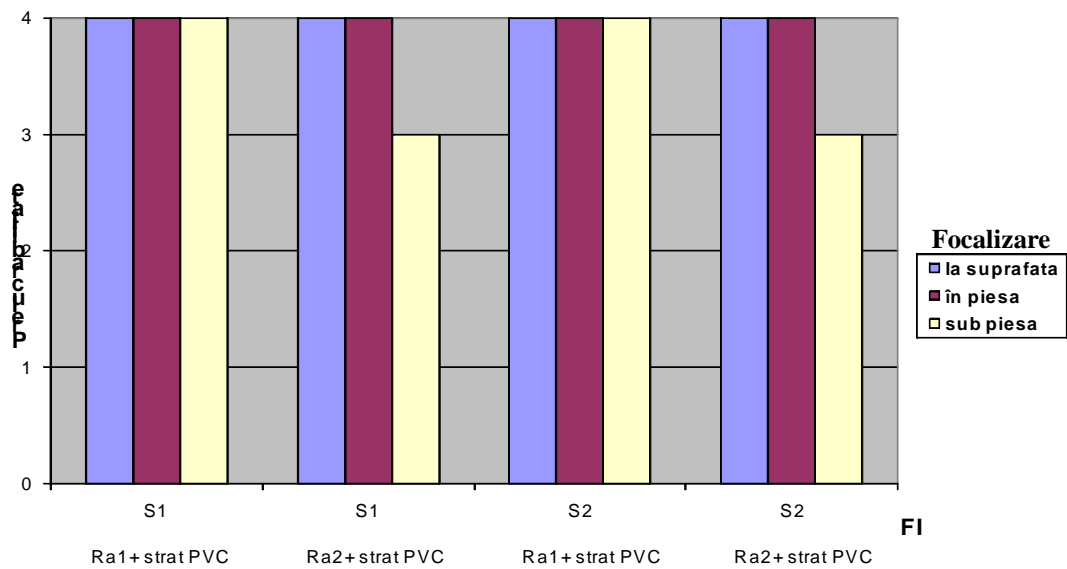


Figura 7.24. Influența rugozității sortului de sticlă BK7 de 1 mm grosime asupra prelucrabilității

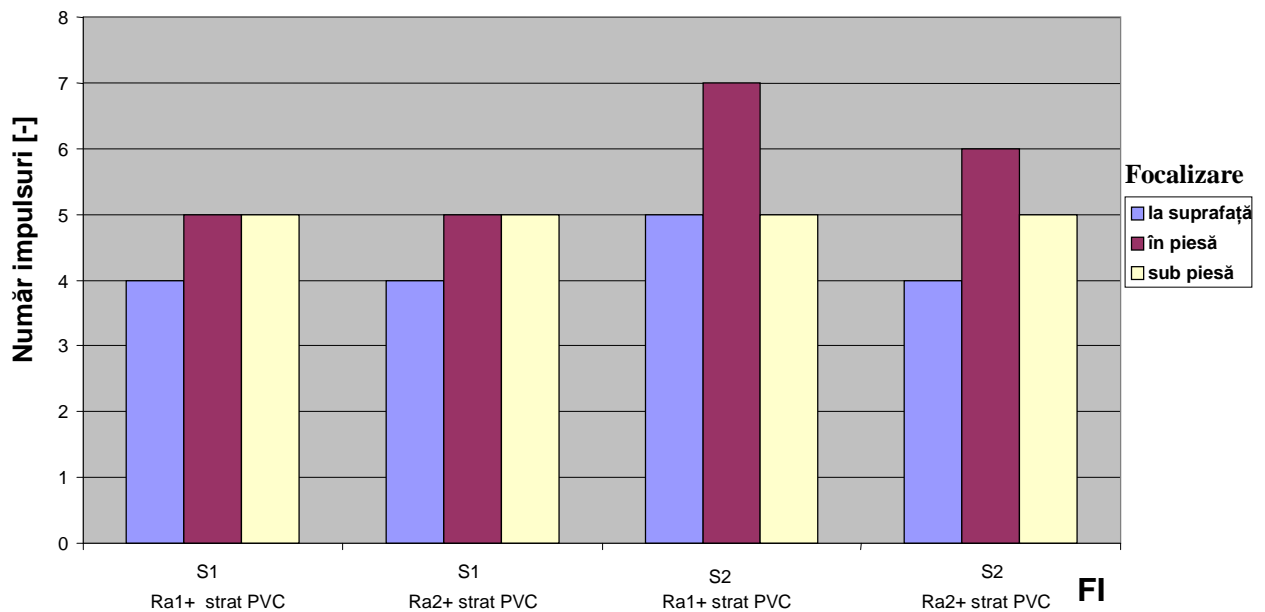
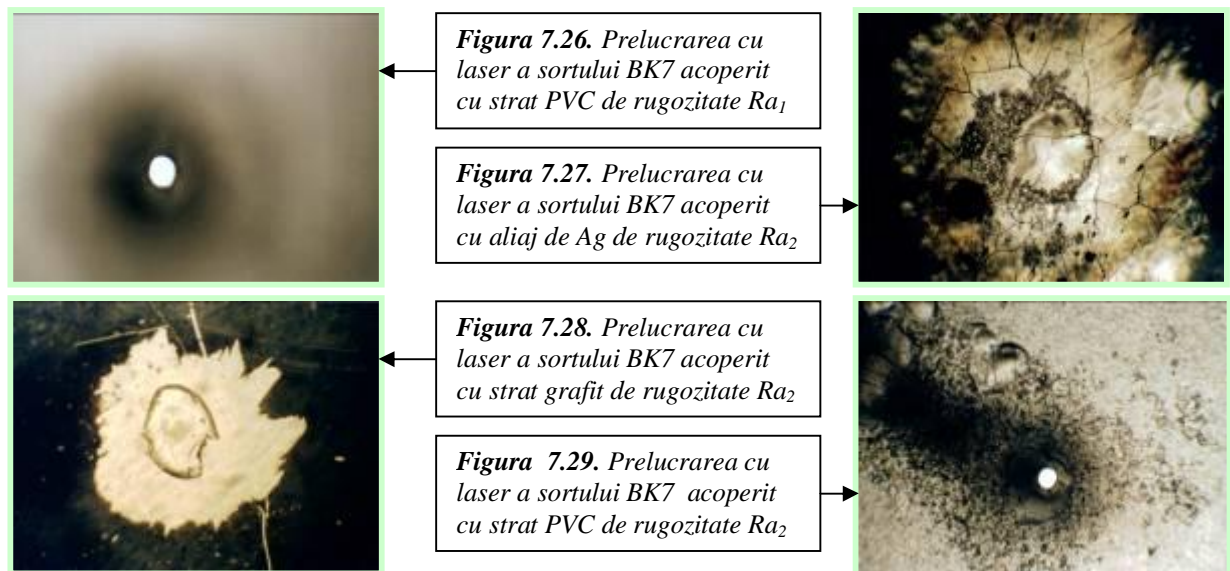


Figura 7. 25. Numărul de impulsuri laser necesare prelucrării sortului BK7 de 1 mm grosime

Pentru aceleași condiții de prelucrare prezentate în figura 7.24., s-a urmărit prelucrabilitatea în funcție de numărul de impulsuri aplicate până la obținerea alezajului dorit. Astfel, nu există diferențe majore la prelucrarea sorturilor BK7 de 1 mm grosime de rugozități Ra₁ sau Ra₂, dacă spotul laser acționează pe suprafața S₁, suprafață care conține și materialul dielectric (PVC). Au fost necesare doar 4 impulsuri pentru obținerea alezajelor în cazul în care fasciculul laser a acționat la suprafață, în

celelalte două situații (în piesă sau sub aceasta) numărul de impulsuri a fost puțin mai mare (cinci impulsuri). Totuși, când spotul laser acționează pe suprafața S_2 , se vede clar diferența de prelucrabilitate pentru sorturile cu rugozități diferite *figura 7.25*. Astfel, cu cât rugozitatea crește, numărul de impulsuri necesare pentru prelucrarea unui alezaj scade. Dacă însă, ne raportăm la aceeași rugozitate a suprafeței prelucrate se observă că atunci când fasciculul laser acționează pe suprafața S_1 care conține și stratul nanometric de PVC, numărul de impulsuri necesare obținerii alezajului scade față de situația în care prelucrarea are loc pe suprafața S_2 , chiar dacă la ieșire fasciculul se regăsește tot pe zona acoperită cu PVC a suprafeței S_1 .

Pentru sorturi de grosimi mai mari de 1 mm prelucrarea nu mai are loc indiferent de materialul de acoperire folosit.



În urma încercărilor făcute, au fost prelucrate prin găurire cu laser sorturile de sticlă BK7 de 1mm grosime, cu rugozitate Ra_1 pe ambele suprafețe S_1 și S_2 și acoperite cu dielectric (PVC) pe una din fețe (*figura 7.26.*), pentru toate cele trei poziții ale planului de focalizare, conform *tabelului 7.12*. În cazul acoperiri cu aliaj de Ag a sorturilor BK7 prelucrarea nu a avut loc, s-a observat doar o îndepărtare a aliajului și eventual o ușoară topire la suprafață a materialului (*figura 7.27.*), fenomen sesizat și în cazul acoperiri cu grafit a acestui sort (*figura 7.28.* pentru rugozitate Ra_2). Modificându-se rugozitatea materialului, s-a putut trage concluzia că prelucrarea a avut loc după un număr mai mic de impulsuri dar calitatea suprafeței prelucrate nu a fost corespunzătoare, generându-se fisuri în zona concentrației maxime de energie (*figura 7.29.* pentru rugozitate Ra_2).

La prelucrarea sorturilor flint SF5 și TF101 (1 mm și 1,5 mm grosime) nu s-a remarcat decât o îndepărtare a stratului metalic la acoperirea cu aliaj de Ag și în unele situații o ușoară topire superficială, prelucrarea realizându-se în aceleași condiții ca la sorturile BK7.

Spre deosebire de sorturile de sticlă optică, sticla ordinară deși a fost de 3 mm grosime s-a prelucrat foarte ușor, după numai două impulsuri datorită impurităților existente în masa acesteia.

Tabelul 7.12. Sistematizarea prelucrărilor efectuate pe instalația laser Nd-sticlă

Nr. crt.	Sort sticlă	Stare suprafață	Poziție plan focalizare	Nr. Impulsuri		Rezultatul prelucrării
				S ₁	S ₂	
1	BK7	Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃ (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + PVC (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + Aliaj Ag Ra ₂ + Grafită	- La suprafață - În piesă - Sub piesă	- 4, 5, 6, 7 -	- 4, 5 -	Nu s-a prelucrat S-a prelucrat Eliminare strat depus, ușoară topire
2	SF5	Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃ (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + PVC (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + Aliaj Ag	- La suprafață - În piesă - Sub piesă	- - -	- - -	Eliminare strat depus, ușoară topire
3	TF101	Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃ (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + PVC (Ra ₁ , Ra ₂ , Ra ₃) + Aliaj Ag	- La suprafață - În piesă - Sub piesă	- - -	- - -	Eliminare strat depus, ușoară topire
4	Sticlă ordinară	Ra ₁	- La suprafață - În piesă - Sub piesă	2	-	S-a prelucrat

Concluzii

Se observă că:

- pe măsură ce omogenitatea și puritatea materialului optic crește, prelucrabilitatea acestuia scade (ex: sticla ordinară față de sticlele optice). În aceste condiții este necesară mărirea puterii radiației laser sau modificarea caracteristicilor optice ale suprafeței materialului prelucrat (adică creșterea rugozității sau modificarea indicelui de refracție prin acoperiri absorbante sau reflectante), astfel încât să aibă loc amorțirea radiației laser în zona de impact care să ducă la prelucrarea piesei optice.
- cu cât grosimea materialului crește și puterea necesară prelucrării acestor materiale crește.
- dintre cele două categorii importante de sticle optice s-au prelucrat doar cele de tip cron (BK7) și numai acoperite cu strat absorbant de PVC.

7.3.2. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu CO₂ GT-1200 de la IFTAR București

S-a pornit inițial de la ideea prelucrării cu acest tip de laser a celor trei materiale atât prin tăiere cât și prin găurire, laserul cu CO₂ folosit putând lucra în regim continuu dar și în puls prin intermediul unui chopper. Astfel s-au folosit două discuri, primul de ½ care permitea fasciculului să acționeze asupra piesei timp de 5 ms din 10 ms (durata unui puls) iar cel de-al doilea de ¼ pentru care fasciculul acționa timp de 2,5 ms.

Pe lângă materialele considerate în studiu s-au ales și câteva materiale pe baza cărora s-au putut stabili factorii de influență care să optimizeze un astfel de proces de prelucrare. În aceste condiții s-au prelucrat sticle pentru condensatori, tuburi PYREX, lentile BK7 și TEMPAX.

TĂIERE

La început toate aceste piese au fost supuse procedului de debitare laser. Parametrii de intrare (FI) au fost:

Tabelul 7.13. Factorii de influență pentru debitarea cu radiație laser CO₂ GT-1200

B ₁ [-]	B ₂ [mm]	B ₃ [μm]	B ₄ [-]	B ₅ [-]
B ₁₁ = BK7	B ₂₁ = 1	B ₃₁ = Ra ₁ = 0,021	B ₄₁ = PVC	B ₅₁ = S ₁
B ₁₂ = SF5	B ₂₂ = 1,5	B ₃₂ = Ra ₂ = 0,57	B ₄₂ = aliaj Ag	B ₅₂ = S ₂
B ₁₃ = TF101	B ₂₃ = 2	B ₃₃ = Ra ₃ = 1,14	B ₄₃ = grafit	B ₅₃ = S ₁ + strat PVC
B ₁₄ = sticlă pentru condensatori	B ₂₄ = 2,5			B ₅₄ = S ₁ + strat aliaj Ag
B ₁₅ = tub PYREX	B ₂₅ = 3			B ₅₅ = S ₁ + strat grafit
B ₁₆ = TEMPAX	B ₂₆ = 5			B ₅₆ = S ₂ → S ₁ + strat PVC
				B ₅₇ = S ₂ → S ₁ + strat aliaj Ag
				B ₅₈ = S ₂ → S ₁ + strat grafit

B ₆ [W]	B ₇ [V]	B ₈ [mm]	B ₉ [atm]	B ₁₀ [-]
B ₆₁ = 300	B ₇₁ = 60	B ₈₁ = 26	B ₉₁ = 0,07	B ₁₀₁ = continuu
B ₆₂ = 350	B ₇₂ = 62	B ₈₂ = 27	B ₉₂ = 0,08	B ₁₀₂ = chopper ½
B ₆₃ = 380	B ₇₃ = 64	B ₈₃ = 28	B ₉₃ = 0,1	B ₁₀₃ = chopper ¼
B ₆₄ = 400	B ₇₄ = 65	B ₈₄ = 28,5	B ₉₄ = 0,15	
B ₆₅ = 420	B ₇₅ = 66	B ₈₅ = 29	B ₉₅ = 0,2	
B ₆₆ = 450	B ₇₆ = 67	B ₈₆ = 30	B ₉₆ = 0,25	
B ₆₇ = 500	B ₇₇ = 68		B ₉₇ = 0,3	
B ₆₈ = 580	B ₇₈ = 69		B ₉₈ = 0,35	
B ₆₉ = 600	B ₇₉ = 70-73		B ₉₉ = 0,4	
B ₆₁₀ = 650	B ₇₁₀ = 76-77		B ₉₁₀ = 0,45	
B ₆₁₁ = 700	B ₇₁₁ = 80		B ₉₁₁ = 0,5-0,8	
B ₆₁₂ = 800 – 850	B ₇₁₂ = 87			

- B_1 – sortul de sticlă optică
- B_2 – grosimea sortului de sticlă [mm]
- B_3 – rugozitatea suprafeței sticlei [μm]
- B_4 – tipul stratului de acoperire al suprafeței
- B_5 – suprafața pe care acționează fasciculul laser
- B_6 – puterea laser [W]
- B_7 – tensiunea [V]
- B_8 – distanța focală [mm]
- B_9 – presiune gaz de lucru [atm]
- B_{10} – mod de operare (regim de lucru)

În urma prelucrărilor s-a remarcat că, în cazul în care materialele au fost prelucrate cu puteri mai mici de 600 W dar cu tensiuni peste 71 V, acestea au fost distruse în zona influențată termic la câteva minute de la prelucrare, fenomen datorat tensiunilor interne existente în aceste materiale. Inițial frontul de eroziune creat de spotul laser topește materialul supus prelucrării, acesta fiind ulterior îndepărtat prin intermediul presiunii induse de jetul de gaz care pentru aceste prelucrări a fost N_2 . Atâta timp cât piesa se află sub acțiunea fasciculului laser prelucrarea pare a fi fără fisuri, zona influențată termic fiind netedă (1). Odată ce acțiunea laser încetează, la capătul tăieturii făcute în piesă apare o fisură vizibilă în formă de V (2). După câteva minute piesa se sparge neregulat în jurul ZIT, toată această parte a piesei desprinzându-se (3). Cele trei etape prin care trece o piesă de tipul celor prelucrate, în cazul tăierii cu laser, sunt prezentate în *figura 7.30*.

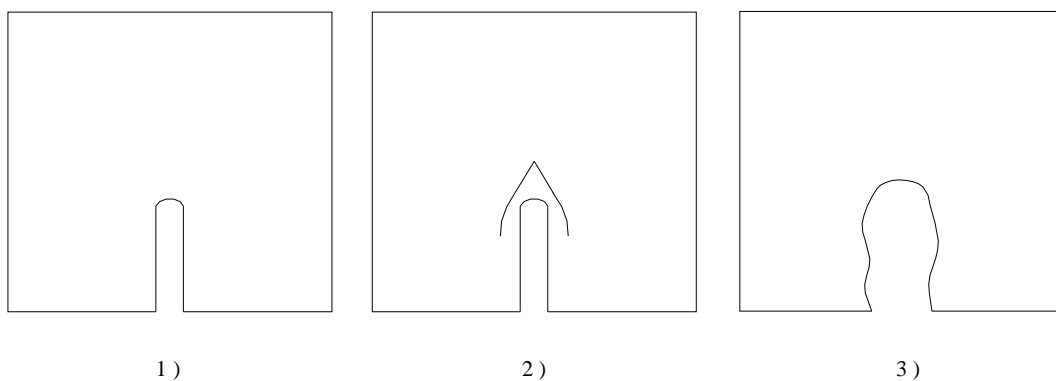


Figura 7.30. Etapele prin care trece un eșantion de sticlă supus prelucrării prin tăiere cu laser

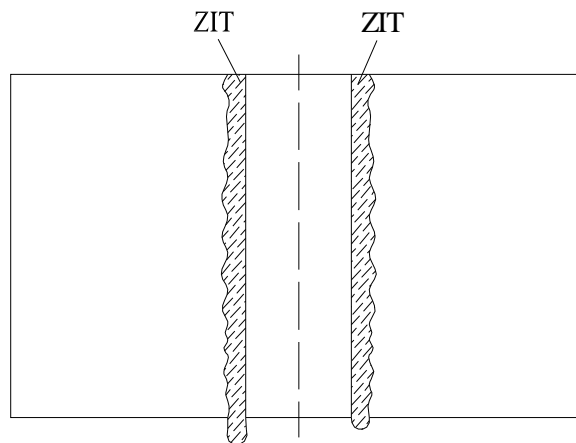


Figura 7.31. Aspectul tăieturii pe grosimea piesei

În general, în zona prelucrată apare și o depunere albă de praf de siliciu. Sub greutate proprie materialul topit din zona prelucrării curge formând bavuri care de cele mai multe ori sunt inegale (figura 7.31). Tot în ZIT apare și o colorare maronie datorată arderii elementelor componente ale materialului.

În urma mai multor încercări efectuate s-au stabilit cele mai bune prelucrări prin tăiere cu laser pentru fiecare material în parte, astfel:

- pentru **BK7** de 3 mm grosime rugozitatea Ra_1 , cea mai bună prelucrare a fost la $P = 800$ W, $U = 70$ V, cu chopper de $\frac{1}{2}$ deoarece fisurile au fost mici și paralele cu ZIT, colorarea în ZIT fiind slabă iar bavurile rezultate în urma prelucrării au fost aproximativ egale. S-a observat că la aceeași tensiune dar la puteri diferite prelucrarea a fost mai bună în cazul unei puteri mai mici când aceasta a fost făcută în regim continuu. La puteri mai mici ($P = 400$ W), când se aplică gaz de lucru până la răcirea definitivă a piesei, presiunea fiind de 0,2 atm iar tensiunea $U = 70$ V, prelucrarea este mult mai bună, prezentând fisuri foarte mici. Distanța focală utilizată în acest caz a fost de 28 mm iar regimul de lucru continuu. Concluzia generală ar fi că prelucrarea prin tăiere laser la puteri mai mici are un aspect mai frumos al tăieturii fără prea multe fisuri dar care necesită o răcire cu gaz atât în timpul, cât și după terminarea prelucrării. O putere prea mică însă, la grosimi de piese mai mari ar putea face ca materialul topit din zona de prelucrare să nu poată fi îndepărtat eficient, ceea ce ar duce la lipirea materialului între pereții tăieturii.
- pentru sortul **SF5** de 1mm grosime, de rugozitate Ra_1 , prelucrarea a fost fără fisuri vizibile pentru $P = 700$ W, $U = 70$ V, distanță focală $f = 29$ mm

și regim de lucru continuu. Dacă pentru aceeași putere tensiunea crește, prelucrarea prin tăiere cu laser în regim continuu este mai bună la tensiuni mai mici.

- pentru sortul **TF101** de 1,5 mm grosime, de rugozitate Ra_1 , prelucrarea cea mai bună a fost în cazul în care $P = 600$ W, $U = 68$ V, în regim pulsant cu chopper $\frac{1}{4}$, la care răcirea s-a făcut cu jet de N_2 . În această situație în ZIT au existat depuneri de siliciu iar bavurile rezultate în urma prelucrării au fost inegale dar uniforme pe lungimea tăieturii. În celelalte situații pentru aceeași putere și aceeași tensiune dar lucrându-se în regim continuu și apoi pulsant cu chopper $\frac{1}{2}$ și $\frac{1}{4}$ s-a putut trage concluzia că o densitate de energie prea mare nu este indicată într-o astfel de prelucrare. Totuși în regim pulsant nu trebuie folosită o putere mai mică de 500 W, chopperul $\frac{1}{4}$ fiind cel mai indicat pentru acest material.
- în cazul **sticlei obișnuite** de 3 mm grosime, condițiile de prelucrare au fost mai bune pentru $P = 600$ W, $U = 80$ V, regim continuu, $f = 28$ mm și gaz de lucru la presiune mică, deoarece fisurile au fost mici iar bavurile egale, materialul prezentând și în acest caz colorare. Dacă la tăierea cu fascicul laser gazul de răcire este introdus cu presiune mare în zona prelucrată, bavurile sunt mai mici iar fisurile sunt atât paralele cât și perpendiculare pe ZIT. În cazul în care s-a folosit răcirea cu gaz în zona prelucrată, parametrii de lucru fiind: $P = 650$ W, $U = 71$ V, regim continuu, $f = 30$ mm, $p = 0,4$ atm, tăietura obținută a fost mult mai bună.
- în cazul **sticlei pentru condensatori** o prelucrare mai bună s-a obținut pentru $P = 650$ W, $U = 71$ V, $p = 0,2$ atm, $f = 28,5$ mm și pentru regim de lucru continuu. Din prelucrările efectuate se constată că odată cu creșterea presiunii gazului de lucru, timpul de distrugere al sticlei în zona influențată termic este mai mic. O altă influență o are și distanța focală care arată că prelucrarea este mai bună la distanță focală mai mare. Regimul de lucru pulsant introduce în sticlă șocuri destul de puternice care duc la deteriorarea totală a sticlei în special în ZIT, unde din cauza șocului termic aplicat asupra piesei de către radiația laser apar și fisuri în lungul sau perpendicular pe zona prelucrată.

- pentru sortul de sticlă borosilicată **TEMPAX** cea mai bună prelucrare este obținută la $P = 400 \text{ W}$, $U = 69 \text{ V}$, presiunea gazului de lucru $p = 0,4 \text{ atm}$, bavurile rezultate fiind mici dar inegale pe cei doi pereți, la 2 mm de capătul tăieturii generându-se o singură fisură, în formă de „V”. La partea superioară tăietura este foarte netedă, pereții fiind paraleli între ei.
- o prelucrare și mai bună se poate observa în cazul **tuburilor PYREX**, la care pentru parametrii: $P = 380 \text{ W}$, $U = 70 \text{ V}$ și răcire cu gaz la presiunea $p = 0,25 \text{ atm}$, folosindu-se și o plăcuță de azbest pentru izolarea zonei prelucrate de zona inferioară a tubului aflată în partea opusă prelucrării, s-a constatat o prelucrare cu bavuri foarte mici cu aspect zimțat, pereții tăieturii fiind aproximativ paraleli între ei iar fisurile fiind inexistente în ZIT. Totuși la capătul prelucrării s-a generat o singură fisură care are aspectul dat în *figura 7.32*.

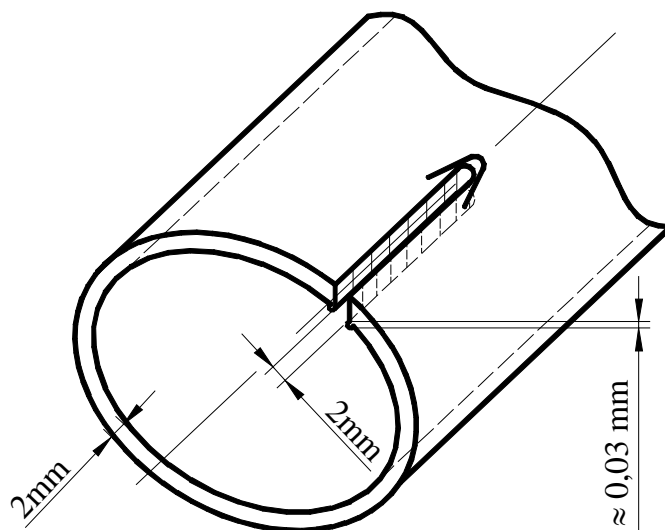


Figura 7.32. Aspectul prelucrării în cazul tuburilor PYREX

Concluzii

Dintre toate aceste materiale prelucrate inițial prezintă interes sorturile BK7, SF5 și TF101, celelalte fiind studiate doar comparativ. Dintre celelalte trei sorturi prelucrate, tuburile PYREX s-au comportat cel mai bine la prelucrarea prin tăiere cu laser cu CO_2 .

Referitor la parametrii considerați importanți pentru acest procedeu de prelucrare s-au putut trage câteva concluzii. În cazul folosirii chopperului pentru grosimi mari ale piesei, cantitatea de căldură indusă de radiația laser în piesa de prelucrat este mai mică, motiv pentru care materialul nu se vaporizează în totalitate ci

prezintă mai mult o topire a acestuia care poate genera bavuri datorită curgerii sub greutate proprie a topiturii. Astfel, odată cu creșterea grosimii piesei este necesară și o putere mai mare pentru vaporizarea totală a materialului și obținerea unei prelucrări corespunzătoare. O altă observație este aceea că, odată cu micșorarea densității de energie (adică trecerea de la regim continuu la regim pulsant) timpul de expunere al piesei la radiația laser pentru ca eșantionul să fie prelucrat, crește. Pe măsură ce rugozitatea materialului crește puterea necesară amorșării radiației laser în piesă scade, prelucrarea fiind mai rapidă.

De cele mai multe ori piesele s-au fisurat și apoi s-au distrus la câteva minute după prelucrare. În unele situații doar unul din pereți a fost distrus, celălalt perete rămânând intact. Toate aceste efecte sunt datorate tensiunilor interne existente în astfel de materiale și temperaturilor ridicate induse de radiația laser în piesă, la care răcirea se face prea brusc. De aceea s-a ajuns la concluzia că, dacă în timpul prelucrării eșantioanele ar fi încălzite într-un cuptor cu temperatură reglabilă și apoi răcite controlat ar putea exista posibilitatea obținerii unor tăieturi fără fisuri sau cu fisuri foarte mici, riscul distrugerii piesei fiind eliminat.

GĂURIRE

O a doua etapă a prelucrărilor cu laser a fost aceea în care s-a trecut de la prelucrarea prin tăiere cu fascicul laser CO₂, la găurirea laser a materialelor care prezentau interes pentru scopul acestei teze. Pornind de la această idee s-a observat ulterior că prelucrarea prin găurire a dat rezultate net superioare tocmai datorită faptului că a eliminat fisurile mari transmise în ZIT prin propagarea căldurii induse de radiația laser în lungul tăieturii. Parametrii de intrare sunt dați în *tabelul 7.14*.

Prelucrările s-au făcut în toate cazurile la distanță focală $f = 28$ mm. S-a renunțat la chopperul $\frac{1}{2}$ deoarece față de prelucrarea în regim continuu nu existau diferențe majore în urma prelucrării pieselor. Totuși s-a constatat că atunci când s-a folosit regimul pulsant alezajul prezenta fisuri datorate șocului dat de pulsul laser.

Tabelul 7.14. Factorii de influență pentru găurirea cu radiație laser CO₂ GT-1200

FI	B ₁ [-]	B ₂ [mm]	B ₃ [μm]	B ₄ [-]	B ₅ [-]
	B ₁₁ = BK7 B ₁₄ = sticlă normală	B ₂₁ = 1 B ₂₂ = 2 B ₂₃ = 2,5 B ₂₄ = 3 B ₂₅ = 5	B ₃₁ = Ra ₁ = 0,021 B ₃₂ = Ra ₂ = 0,57	B ₄₁ = PVC	B ₅₁ = S ₁ B ₅₂ = S ₂ B ₅₃ = S ₁ + strat PVC B ₅₄ = S ₂ → S ₁ + strat PVC

FI	B ₆ [W]	B ₈ [mm]	B ₉ [atm]	B ₁₀ [-]	B ₁₁ [s]
	B ₆₁ = 400 B ₆₂ = 420 B ₆₃ = 440 B ₆₄ = 450	B ₈₁ = 28	B ₉₁ = 0,2 B ₉₂ = 0,25 B ₉₃ = 0,3 B ₉₄ = 0,35 B ₉₅ = 0,4 B ₉₆ = 0,5 B ₉₇ = 0,6 B ₉₈ = 0,7	B ₁₀₁ = continuu B ₁₀₂ = chopper ¼	B ₁₁₁ = 0,5 B ₁₁₂ = 0,8 B ₁₁₃ = 1 B ₁₁₄ = 1,5 B ₁₁₅ = 2 B ₁₁₆ = 3 B ₁₁₇ = 4

- B₁₁ – durata de perforare a piesei [s].

Totodată s-a urmărit și timpul în care piesa a fost perforată pe întreaga sa grosime, observându-se următoarele:

- dacă presiunea gazului de lucru crește la aceeași putere a radiației laser aplicate piesei, durata până la perforarea sticlei scade.
- dacă la aceeași presiune se aplică puteri diferite ale radiației, timpul până la perforare va fi mai scurt pentru radiația de putere mai mare.
- pentru grosimi diferite ale materialului la aceeași parametri utilizați, timpul până la perforare va fi mai mic pentru grosimi mai mici.
- la aceeași presiune și putere dacă se lucrează în regim continuu, timpul până la perforare e mai scurt decât în cazul regimului pulsat.
- dacă prelucrarea se face de pe suprafața cu rugozitate mai mare pe suprafața cu rugozitate mai mică, timpul de prelucrare scade.

Concluzii

În urma prelucrărilor făcute, atât prin tăiere cât și prin găurire, s-a stabilit ca pentru cele trei sorturi de sticlă optică să aplice doar prelucrarea prin găurire cu radiație laser cu CO₂. Acest lucru a fost posibil și datorită limitării fisurilor în cazul prelucrării prin găurire doar în ZIT, în această situație piesele nedistrugându-se după prelucrare chiar dacă tensiunile interne din piese erau aceleași, zona încălzită termic fiind însă mult mai mică. Conform factorilor de influență din cele două tabele de mai sus, s-a stabilit care este importanța acestor factori prin ierarhizarea lor în funcție de influența pe care aceștia o au în prelucrarea propriu-zisă a materialelor optice.

Plecând de la aceste premize s-au pus bazele unei cercetări experimentale care a vizat prelucrarea celor trei sorturi de sticlă optică (BK7, SF5 și TF101) astfel încât să se ajungă la o optimizare a procesului de prelucrare, punându-se accent atât pe aspectul zonei influențate termic precum și pe interacțiunea radiației laser – material prelucrat.

7.3.2.1. Cercetările experimentale în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser a celor trei sorturi de sticlă optică, efectuate pe instalația laser cu CO₂ GT-1200 de la IFTAR București

În cazul modelării proceselor tehnologice [14], [15], [16], [17], [18], [19], [51], [69], una din cele mai eficiente metode de modelare experimentală este aceea a experimentului factorial care implică parcurgerea următoarelor etape:

- stabilirea domeniului de experimentare, adică a nivelului de bază (punctul central al experimentului) și a intervalului de variație al fiecărui factor de influență
- construcția matricii program a experimentării și realizarea propriu-zisă a experimentelor
- determinarea modelului matematic a funcției obiective investigate, prin alegerea formei modelului matematic (de regulă polinomial), calcularea coeficienților de regresie și respectiv analiza statistică a modelului obținut.

Pentru analiza rezultatelor experimentale s-a folosit programul STATGRAPHICS [15, 16, 52, 87], produs al firmei MICROSOFT, un software care nu lucrează cu valori fizice pentru variabilele independente, ci cu valori codificate ale acestora.

Experimentele preliminare discutate anterior precum și informațiile deținute pe cale bibliografică au dus la identificarea următorilor factori de influență semnificativi (din cei B₁-B₁₁ factori de influență conform *tabelului 7.3*) asupra funcțiilor obiectiv analizate:

- B₁ – sortul de sticlă (BK7, SF5, TF101)
- B₂ – grosimea sticlei (1, 1,5, 2 mm)
- B₃ – rugozitatea sortului de sticlă (Ra₁=0,02; Ra₂=0,57; Ra₃=1,12 μm)
- B₄ – puterea radiației laser (200, 300, 400 W)
- B₅ – modul de operare (continuu, chopper 1/2, chopper 1/4)

Ținând cont de FO și de FI reprezentativi pentru procesul de prelucrare studiat, s-a optat în această situație pentru mai multe experimente factoriale complete în care factorii de influență au fost grupați astfel încât să evidențieze influența lor asupra funcțiilor obiectiv după cum urmează:

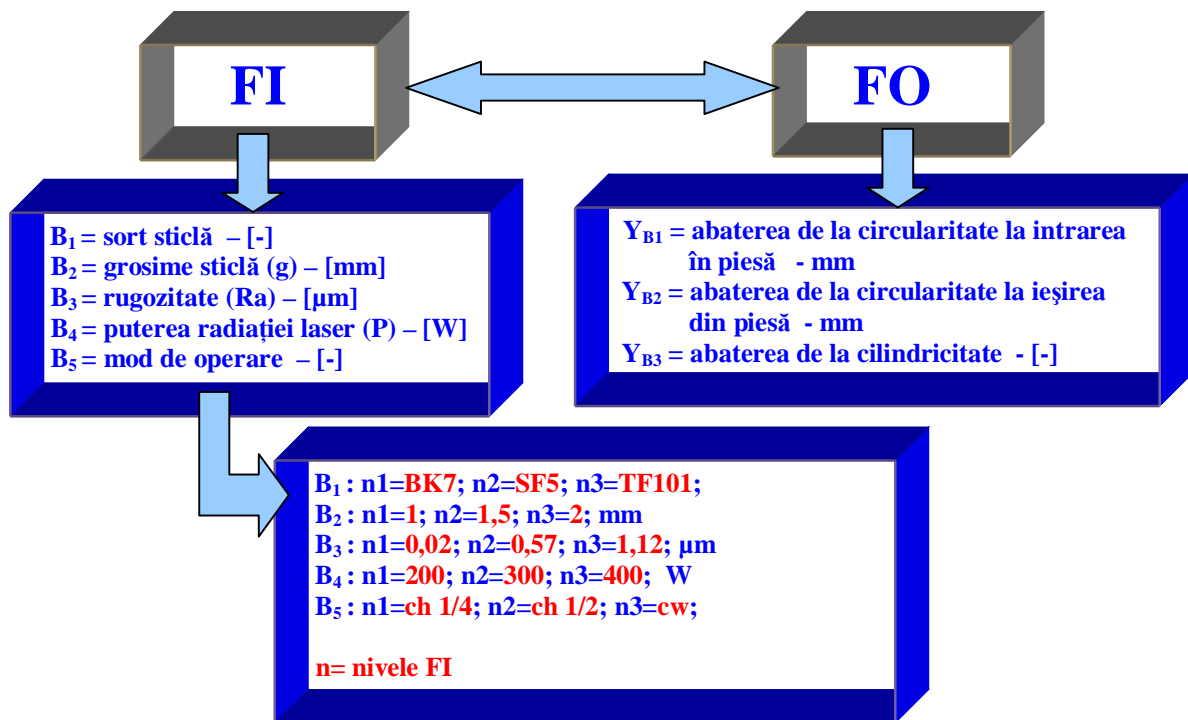


Figura 7.33. Factorii de influență și funcțiile obiectiv la prelucrarea prin găurire cu radiație laser pe instalația laser cu CO_2 GT-1200 de la IFTAR București

Experimentul 1

În acest caz s-a aplicat un experiment factorial complet 2^3 ce presupunea 8 încercări, pentru care s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului inferior și superior, precum și intervalele de variație ale FI, sintetizate în tabelul 7.15.

Tabelul 7.15. Alegerea domeniilor de variație a FI pentru experimentul factorial complet 2^3

Factorii de influență	Cod	x_{B2} [mm]	x_{B3} [μm]	x_{B4} [W]
Nivelul zero	0	1,5	0,57	300
Intervalul de variație	ΔI	0,5	0,55	100
Nivelul superior	+1	2	1,12	400
Nivelul inferior	-1	1	0,02	200

Experimentul s-a efectuat pentru sortul BK7 în condițiile în care modul de operare cu radiație laser a fost în regim continuu.

Funcțiile de răspuns Y_{B1} , Y_{B2} , Y_{B3} au fost calculate cu ajutorul formulelor (7.1), (7.2) și respectiv (7.3). Modelul experimental este o funcție de gradul I cu forma generală:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_{Bj} \quad (7.4)$$

în care x_{Bj} – factorii de influență

b_0 - b_j – coeficienții de regresie.

Tabelul 7.16. Matricea program a experimentului factorial complet 2^3 analizat

Nr. încercare	Nivel factor de influență				Simbolizare	FO		
	x_0	x_{B2}	x_{B3}	x_{B4}		$Y_{B1} \cdot 10^{-3}$	$Y_{B2} \cdot 10^{-3}$	Y_{B3}
1	1	-1	-1	-1	-1	12	12,5	0,31
2	1	1	-1	-1	a	36	24,5	0,29
3	1	-1	1	-1	b	59,5	12,5	0,34
4	1	1	1	-1	ab	12	11,5	0,36
5	1	-1	-1	1	c	48	24	0,35
6	1	1	-1	1	ac	32,5	47,5	0,28
7	1	-1	1	1	bc	24	12	0,24
8	1	1	1	1	abc	0	36	0,28

În tabelul 7.16 este prezentată matricea program a experimentului factorial complet 2^3 cu 3 factori de influență.

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [1,6, 87]. S-au determinat conform modelului matematic impus:

- coeficienții de regresie pentru polinomul de gradul I (tabelul 7.17);
- influența FI și interacțiunile semnificative dintre factori;
- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației FO când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (figura 7.34);
- compararea valorilor măsurate cu cele estimate, la o precizie de estimare de 82,7% pentru Y_{B1} , 98,16% pentru Y_{B2} , 94,89% pentru Y_{B3} (figura 7.35);
- suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență (figurile 7.36 - 7.44).

Valorile coeficienților de regresie din tabelul 7.17, fac ca forma modelului matematic polinomial (7.4) pentru FO - Y_{B1} să devină:

$$Y_{B1} = -17,3273 + 19,1455A + 91,3636B + 0,1557C - 32,2727AB - 0,0625AC - 0,1613BC \quad (7.5)$$

$$Y_{B2} = 15,5398 - 9,5113A + 7,3863B - 0,0501C - 5,6818AB + 0,0912AC - 0,0238BC \quad (7.6)$$

$$Y_{B3} = 0.317977 - 0.0238636A - 0.0238636B + 1.97045 \cdot 10^{-4}C + 0.0681818AB - 7.5 \cdot 10^{-5}AC - 4.7727 \cdot 10^{-4}BC \quad (7.7)$$

Tabelul 7.17. Valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic analizat al FO – Y_{B1}, Y_{B2}, Y_{B3}

FO – Y _{B1}		FO – Y _{B2}		FO – Y _{B3}	
Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b ₀	-17.3273	b ₀	15.5398	b ₀	0.317977
b ₁	19.1455	b ₁	-9.51136	b ₁	-0.0238636
b ₂	91.3636	b ₂	7.38636	b ₂	-0.0238636
b ₃	0.155727	b ₃	-0.0501477	b ₃	1.97045 · 10 ⁻⁴
b ₁₂	-32.2727	b ₁₂	-5.68182	b ₁₂	0.0681818
b ₁₃	-0.0625	b ₁₃	0.09125	b ₁₃	-7.5 · 10 ⁻⁵
b ₂₃	-0.161364	b ₂₃	-0.0238636	b ₂₃	-4.7727 · 10 ⁻⁴

Semnul „-”, aflat în fața coeficienților de regresie aferenți factorilor de influență sau interacțiunilor de ordin doi dintre factori, arată că influența acestora tinde să diminueze valoarea funcției obiectiv analizate.

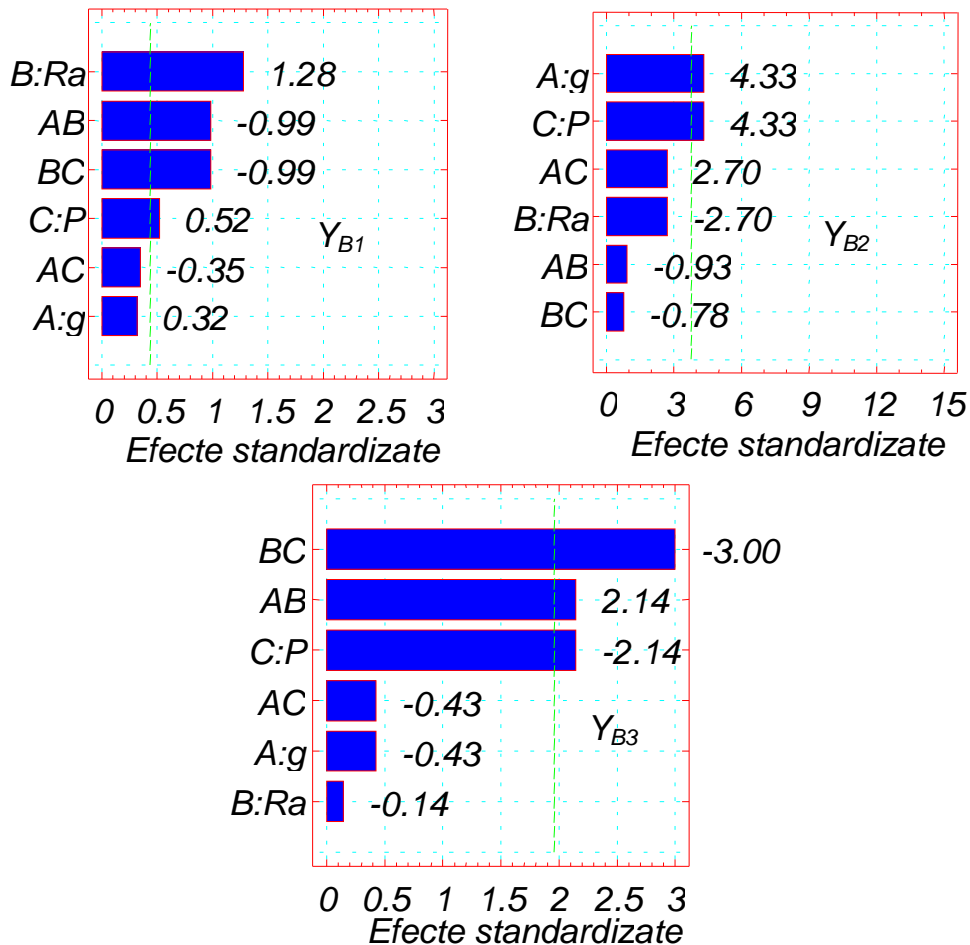


Figura 7.34. Histogramele efectelor variabilelor independente asupra FO

În figura 7.34. avem următoarele notații:

(A) - grosimea sortului de sticlă

(B) - rugozitatea materialului

(C) - puterea radiației laser

(AB), (AC), (BC) - interacțiunile de ordin doi dintre cei trei FI

Din cele trei histograme ale efectelor variabilelor independente asupra funcțiilor obiectiv Y_{B1} , Y_{B2} și Y_{B3} , prin eliminarea efectelor ne semnificative ale factorilor de influență, ecuațiile polinomiale ale modelelor matematice devin:

$$Y_{B1} = -17,3273 + 91,3636B + 0,1557C - 32,2727AB - 0,1613BC \quad (7.8)$$

$$Y_{B2} = 15,5398 - 9,5113A - 0,0501C \quad (7.9)$$

$$Y_{B3} = 0.317977 + 1.97045 \cdot 10^{-4}C + 0.0681818AB - 4.7727 \cdot 10^{-4}BC \quad (7.10)$$

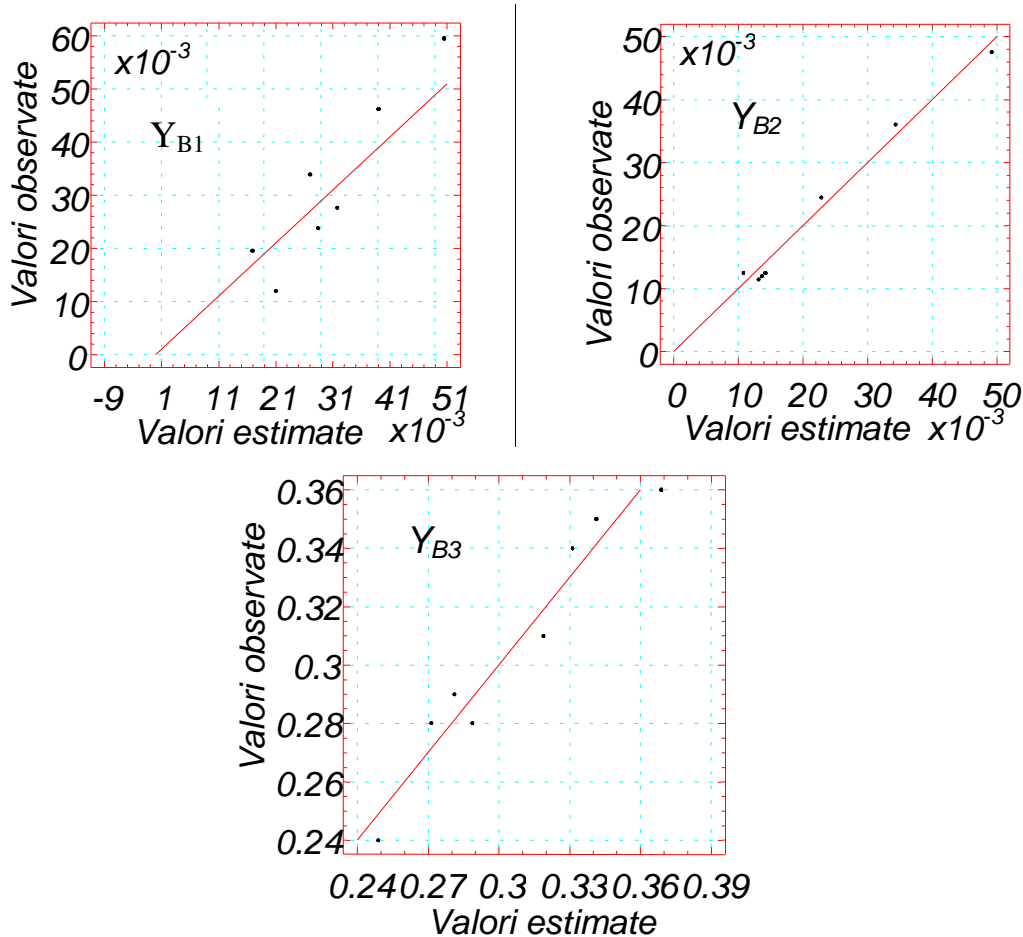


Figura 7.35. Precizia de estimare a modelului matematic pentru cele trei funcții obiectiv analizate

Precizia de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv în parte arată că există o concordanță relativ bună între valorile estimate și cele rezultate în urma experimentului aplicat.

O analiză mai bună a influenței factorilor de intrare considerați importanți pentru prelucrarea prin găurire cu radiație laser asupra funcțiilor obiectiv stabilite este dată de curbele de răspuns reprezentate în figurile 7.36 - 7.44. La curbele de nivel constant se renunță în acest studiu deoarece curbele de răspuns sunt suficient de sugestive pentru analizarea influenței fiecărui factor în parte.

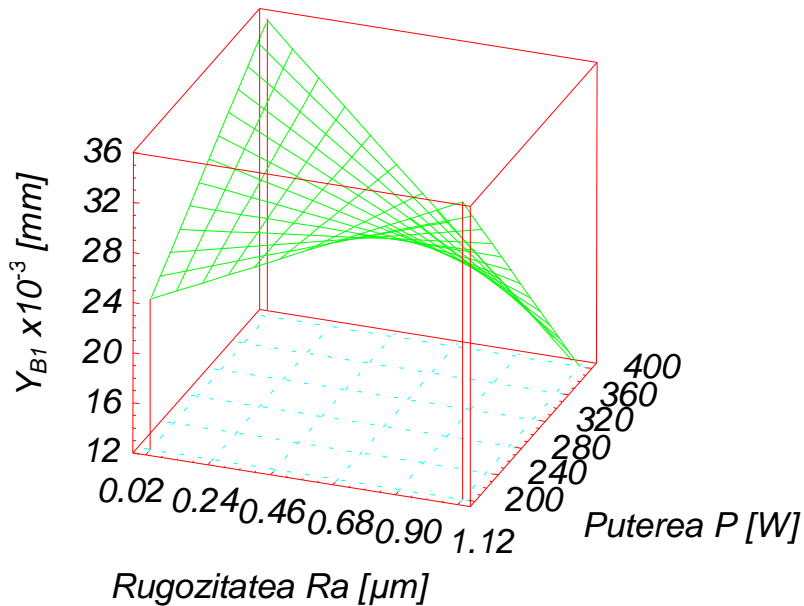


Figura 7.36. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

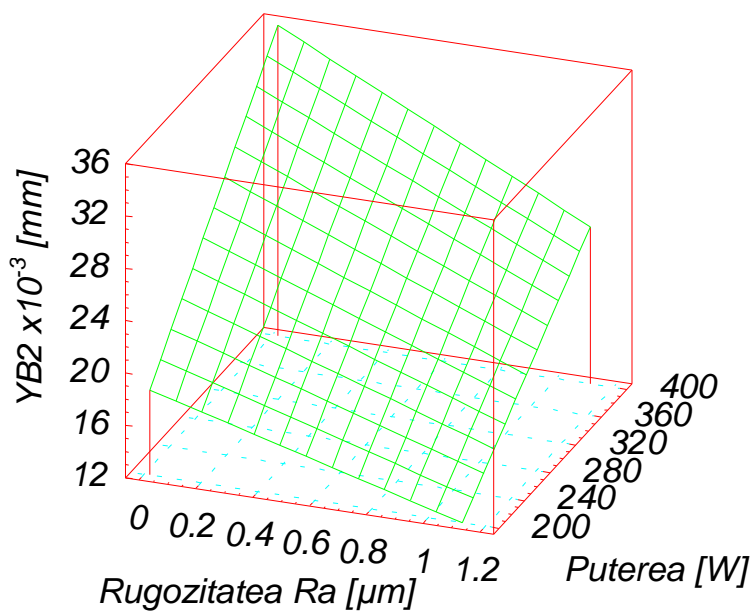


Figura 7.37. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

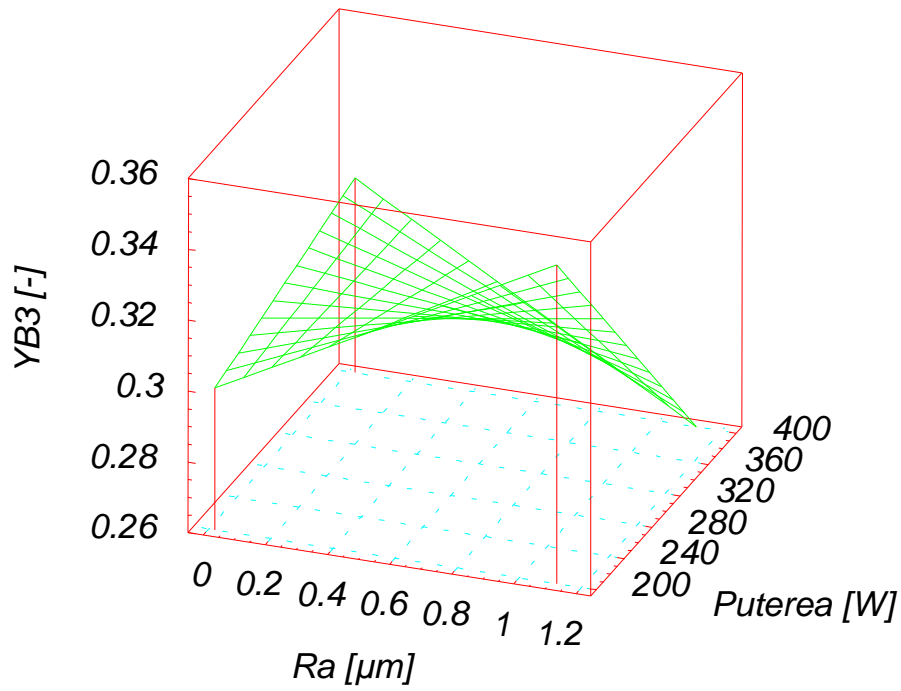


Figura 7.38. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

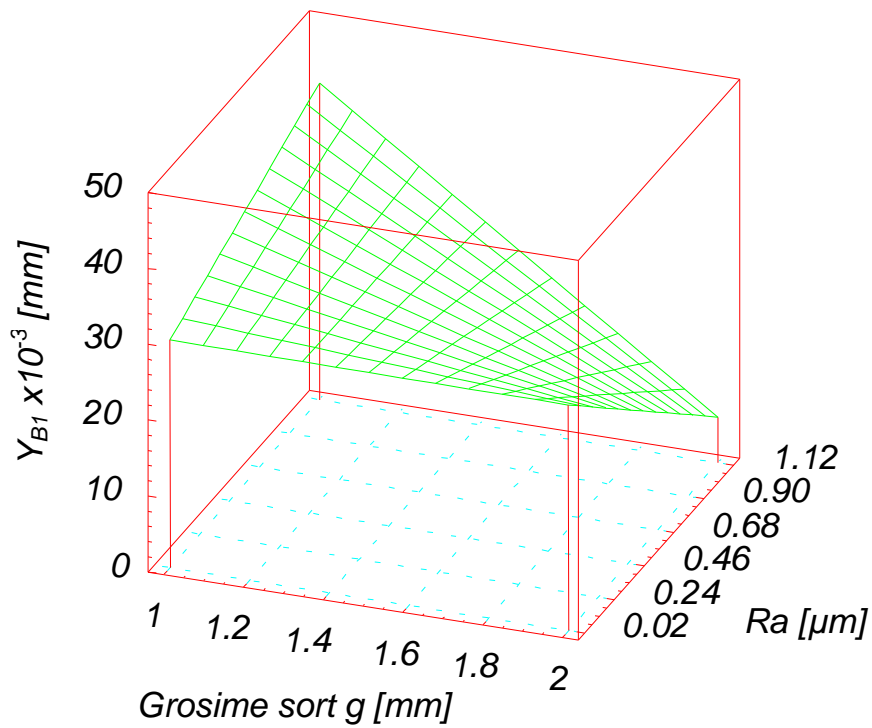


Figura 7.39. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B1}

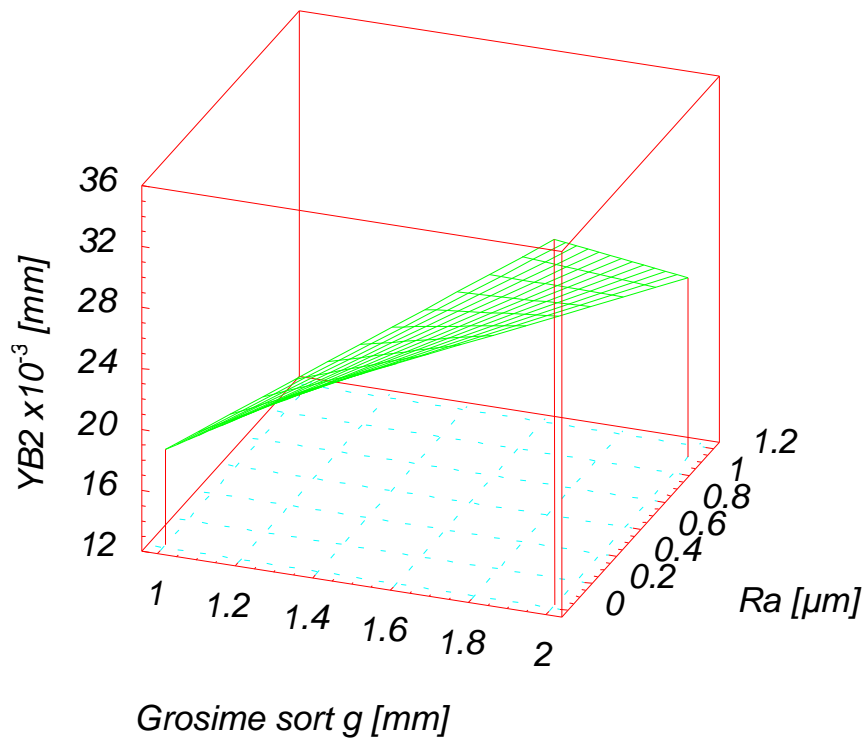


Figura 7.40. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B2}

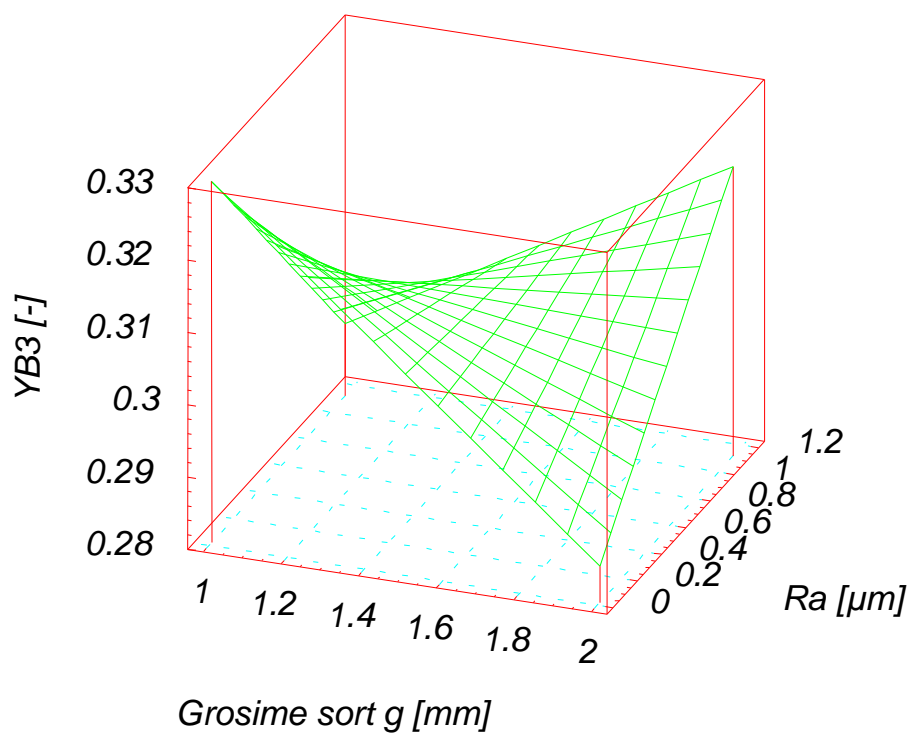


Figura 7.41. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B3}

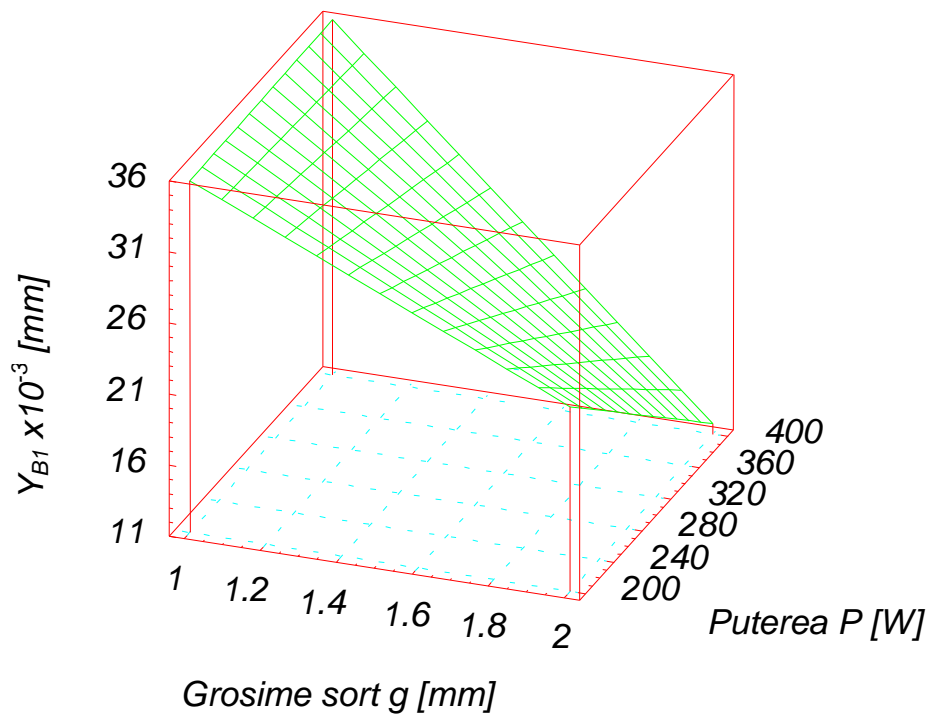


Figura 7.42. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

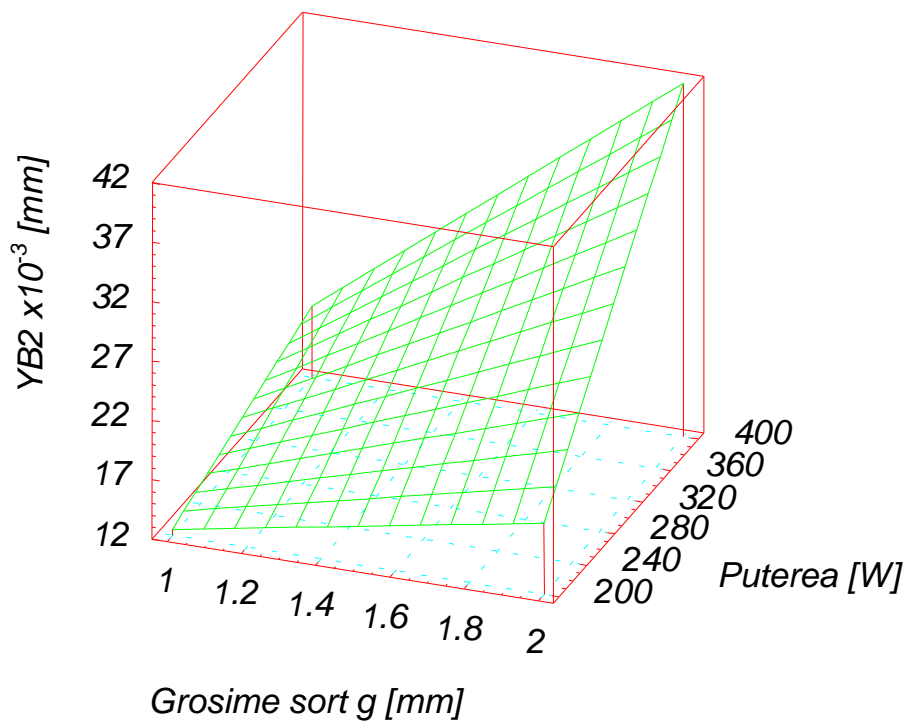


Figura 7.43. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

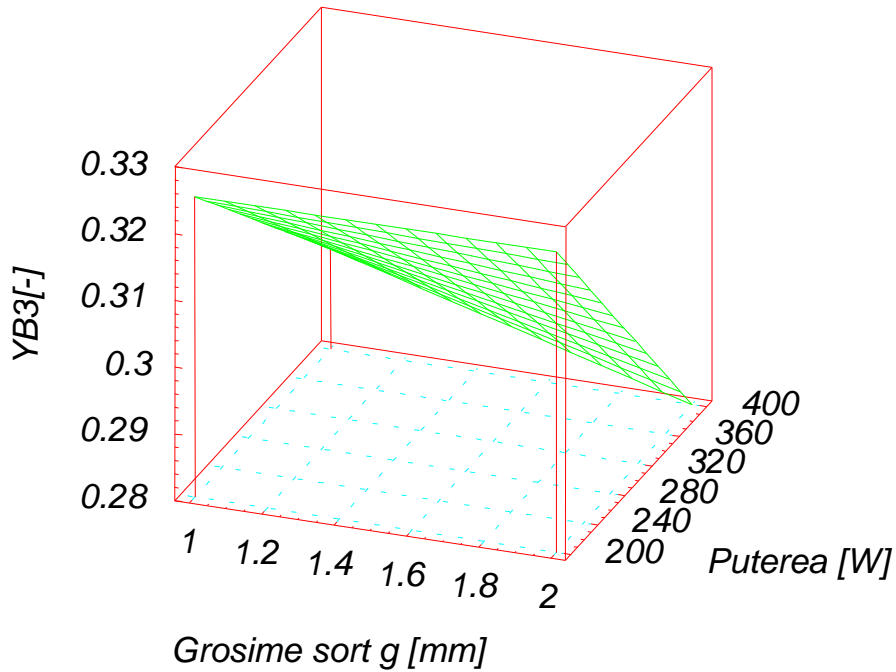


Figura 7.44. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Curbele de răspuns prezentate anterior arată influența celor trei factori: grosimea materialului prelucrat, rugozitatea acestuia precum și puterea radiației laser asupra funcțiilor obiectiv Y_{B1} , Y_{B2} , Y_{B3} .

Astfel, pentru funcția obiectiv Y_{B1} – abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă, se poate remarca că aceasta este minimă pentru valori maxime ale celor trei factori de influență – puterea radiației laser, rugozitatea materialului și grosimea acestuia (figurile 7.36, 7.39, 7.42). La grosimi mici ale sortului de sticlă, puterea nu mai are influență semnificativă asupra abaterii de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă.

În ceea ce privește influența aceluiași factori asupra funcției obiectiv Y_{B2} – abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă, observăm că o valoare minimă a acesteia se obține pentru grosimii mici ale sortului BK7 și puteri mici ale radiației laser cu CO_2 dar la valori mari ale rugozității acestui material (figurile 7.37, 7.40, 7.43).

Abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă – Y_{B3} tinde spre valori minime pentru valori maxime ale puterii radiației laser și grosimi mari ale sortului de sticlă dar pentru rugozități medii ale materialului prelucrat (figurile 7.38, 7.41, 7.44). Aceasta dovedește că sortul de sticlă optică BK7 cu rugozitate mică

(transparent) se comportă mai bine decât cel cu rugozitate mai mare (mat) pentru o valoare a grosimii de material de 2 mm, fapt explicat printr-o absorbție a radiației laser în piesă mult mai mică pentru suprafețele transparente care permite o prelucrare mai bine direcționată în astfel de materiale. Se mai observă că la puteri mici ale radiației laser, grosimea sortului de sticlă nu are influență semnificativă asupra funcției obiectiv pentru procesul de prelucrare prezentat.

Experimentul 2

Cel de-al doilea experiment s-a aplicat tot pe sortul de sticlă optică BK7 dar pentru un regim de lucru în puls realizat cu ajutorul unui chopper de $\frac{1}{4}$ (capitolul 7.1). În această situație s-a ales un experiment factorial complet 2^3 ce presupunea 8 încercări, pentru care coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului inferior și superior, precum și intervalele de variație ale FI, sunt date în tabelul 7.18.

Tabelul 7.18. Alegerea domeniilor de variație a FI pentru experimentul factorial complet 2^3

Factorii de influență	Cod	x_{B2} [mm]	x_{B3} [μ m]	x_{B4} [W]
Nivelul zero	0	1,5	0,57	300
Intervalul de variație	ΔI	0,5	0,55	100
Nivelul superior	+1	2	1,12	400
Nivelul inferior	-1	1	0,02	200

Tabelul 7.19. Matricea program a experimentului factorial complet 2^3 analizat

Nr. încercare	Nivel factor de influență				Simbolizare	FO		
	x_0	x_{B2}	x_{B3}	x_{B4}		$Y_{B1} \cdot 10^{-3}$	$Y_{B2} \cdot 10^{-3}$	Y_{B3}
1	1	-1	-1	-1	-1	0	23	0,16
2	1	1	-1	-1	a	24	24	0,41
3	1	-1	1	-1	b	12	11,5	0,21
4	1	1	1	-1	ab	12	11,5	0,40
5	1	-1	-1	1	c	12	0	0,33
6	1	1	-1	1	ac	12	36	0,34
7	1	-1	1	1	bc	23,5	36	0,16
8	1	1	1	1	abc	24	24	0,40

Se poate remarca că s-au păstrat cei trei factori de influență tocmai pentru a arăta modul de comportare al sortul BK7 în cazul celor două regimuri diferite de prelucrare.

Funcțiile de răspuns Y_{B1} , Y_{B2} , Y_{B3} au fost calculate cu ajutorul formulelor (7.1), (7.2) și respectiv (7.3). Modelul experimental este o funcție de gradul I cu forma generală dată de formula (7.4).

Astfel, în *tabelul 7.19* este prezentată matricea program a experimentului factorial complet 2^3 cu cei 3 factori de influență și respectiv măsurătorile efectuate pentru funcțiile obiectiv analizate și anume, cele două abateri de la circularitate la intrare (Y_{B1}) și respectiv la ieșirea radiației din piesă (Y_{B2}), precum și abaterea de la cilindricitate (Y_{B3}).

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul aceluiași program statistic, determinându-se conform modelului matematic impus, următoarele:

- coeficienții de regresie pentru polinomul de gradul I (*tabelul 7.20*);
- influența FI și interacțiunile semnificative dintre factori;
- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației FO când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (*figura 7.45*);
- compararea valorilor măsurate cu cele estimate dată tabelar de precizia de estimație pentru fiecare funcție obiectiv în parte (*tabelul 7.21*);
- suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență (*figurile 7.46 - 7.54*).

Tabelul 7.20 Valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic analizat al celor trei FO

FO – Y_{B1}		FO – Y_{B2}		FO – Y_{B3}	
Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b_0	-32.5443	b_0	27.1114	b_0	-0.173159
b_1	29.8386	b_1	1.69545	b_1	0.270955
b_2	5.34091	b_2	0.681818	b_2	-0.0295455
b_3	0.0870568	b_3	-0.115932	b_3	$9.69318 \cdot 10^{-4}$
b_{12}	-10.6818	b_{12}	-22.2727	b_{12}	0.0772727
b_{13}	-0.05875	b_{13}	0.0575	b_{13}	$-4.75 \cdot 10^{-4}$
b_{23}	0.0534091	b_{23}	0.109091	b_{23}	$-3.40909 \cdot 10^{-4}$

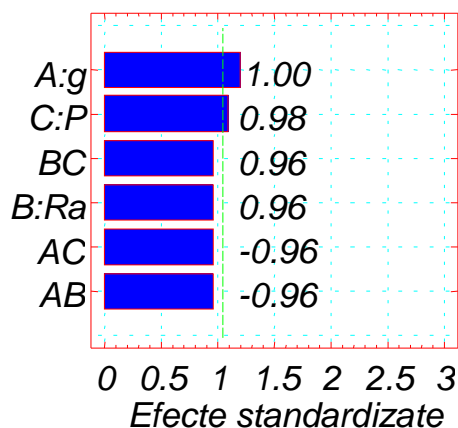
Valorile coeficienților de regresie din *tabelul 7.18*, fac ca forma modelului matematic polinomial (7.4) pentru FO - Y_{B1} , Y_{B2} și Y_{B3} să devină:

$$Y_{B1} = -32.5443 + 29.8386A + 5.34091B + 0.0870568C - 10.6818AB - 0.05875AC + 0.0534091BC \quad (7.11)$$

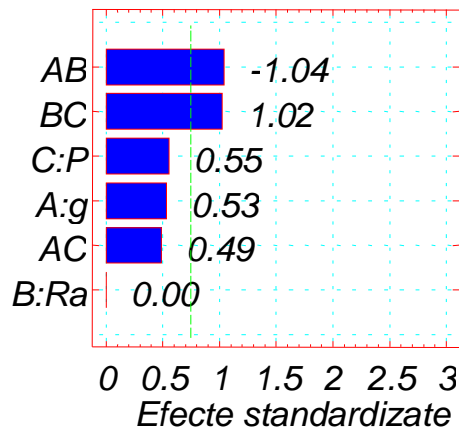
$$Y_{B2} = 27.1114 + 1.69545A + 0.681818B - 0.115932C - 22.2727AB + 0.0575AC + 0.109091BC \quad (7.12)$$

$$Y_{B3} = -0.173159 + 0.270955A - 0.0295455B + 9.69318 \cdot 10^{-4}C + 0.0772727AB - 4.75 \cdot 10^{-4}AC - 3.40909 \cdot 10^{-4}BC \quad (7.13)$$

Histograma efectelor pentru Y_{B1}



Histograma efectelor pentru Y_{B2}



Histograma efectelor pentru Y_{B3}

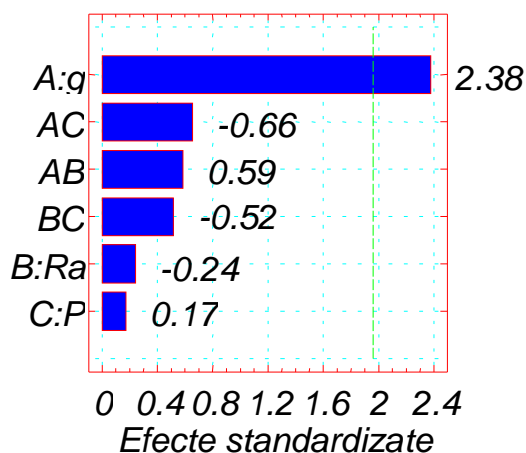


Figura 7.45. Histogramele efectelor variabilelor independente asupra FO

Din cele trei histograme ale efectelor variabilelor independente asupra funcțiilor obiectiv Y_{B1}, Y_{B2} și Y_{B3}, prin eliminarea efectelor ne semnificative ale factorilor de influență, ecuațiile polinomiale ale modelelor matematice devin:

$$Y_{B1} = -32.5443 + 29.8386A + 0.0870568C \quad (7.14)$$

$$Y_{B2} = 27.1114 - 22.2727AB + 0.109091BC \quad (7.15)$$

$$Y_{B3} = -0.173159 + 0.270955A \quad (7.16)$$

Tabelul 7.21. Precizia de estimare a modelului matematic analizat pentru cele trei FO

FO – Y _{B1}	FO – Y _{B2}	FO – Y _{B3}
Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]
84,85	84,73	87,16

Precizia de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv în parte este dată în tabelul 7.21. Se observă că există o concordanță relativ bună între

valorile estimate cu ajutorul modelului polinomial adoptat și cele rezultate în urma experimentului.

Pentru o analiză mai bună a influenței factorilor asupra funcțiilor obiectiv care fac subiectul acestei teze de doctorat, se vor prezenta în cele ce urmează curbele de răspuns ale tuturor combinațiilor dintre factorii de influență, renunțându-se însă la curbele de nivel constant deoarece informațiile sunt suficiente pentru interpretarea rezultatelor.

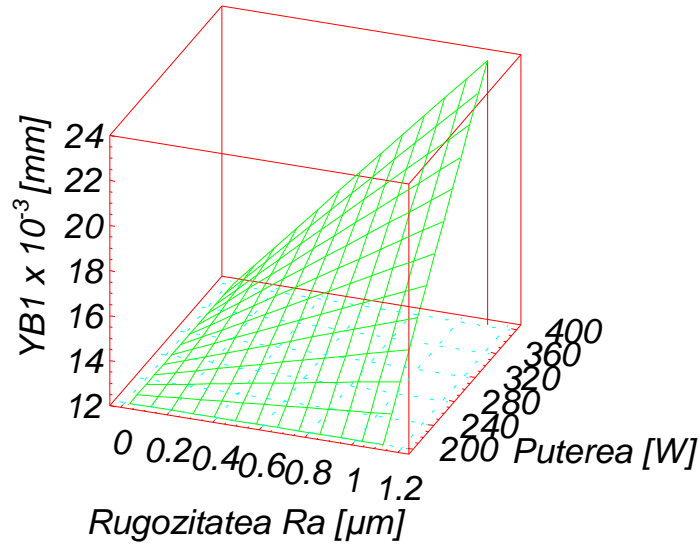


Figura 7.46. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

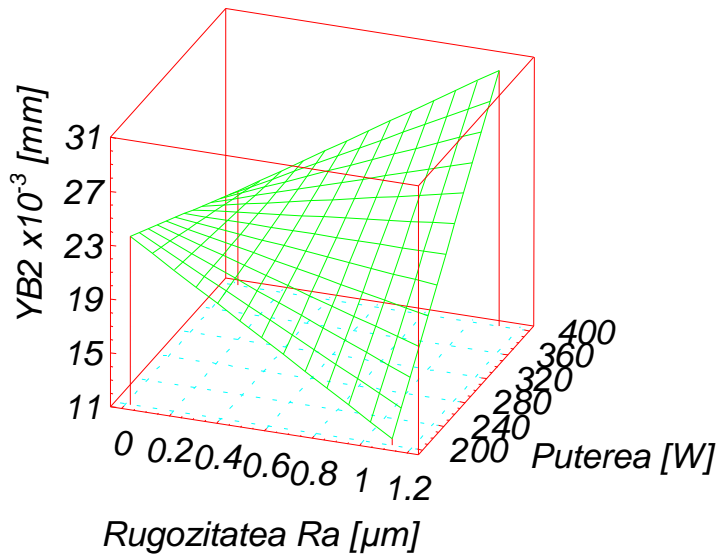


Figura 7.47. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

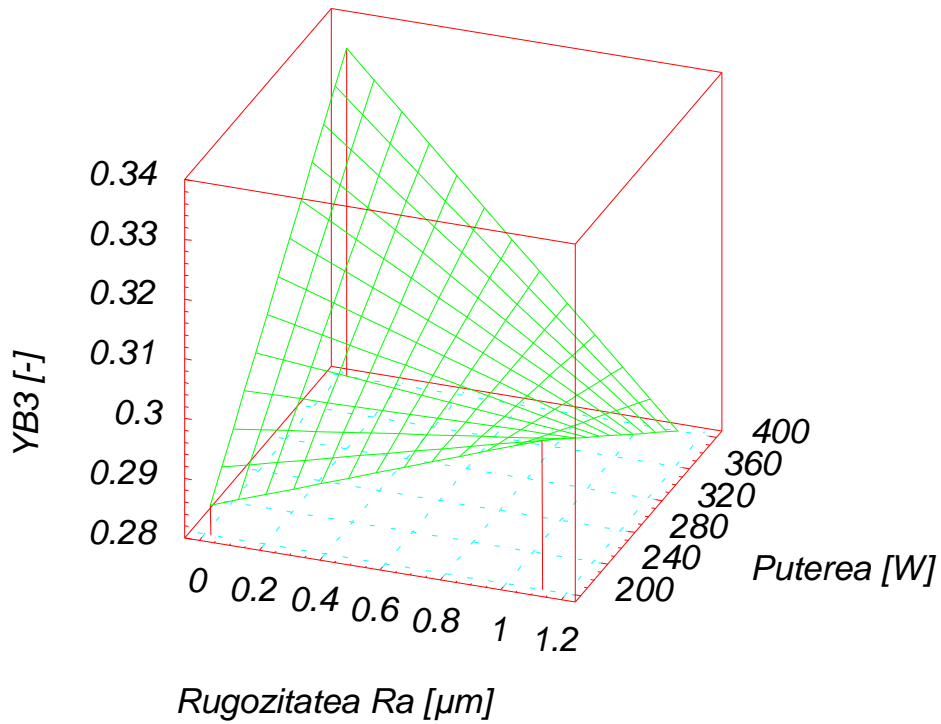


Figura 7.48. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

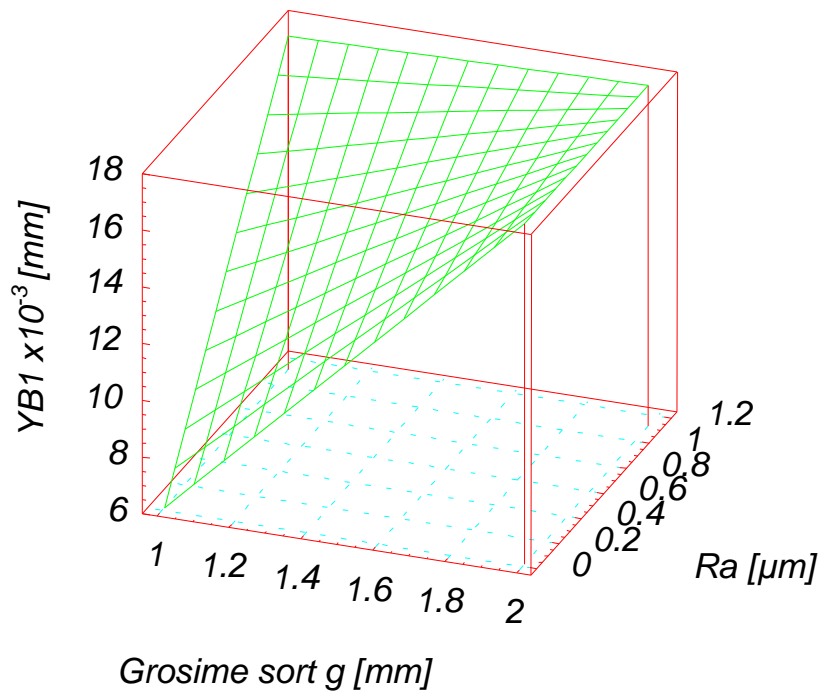


Figura 7.49. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B1}

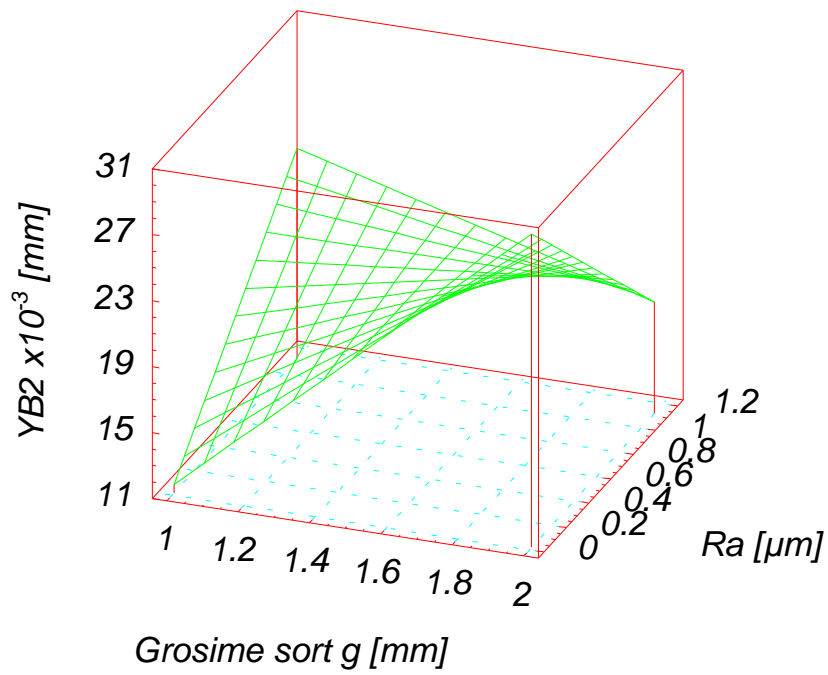


Figura 7.50. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B2}

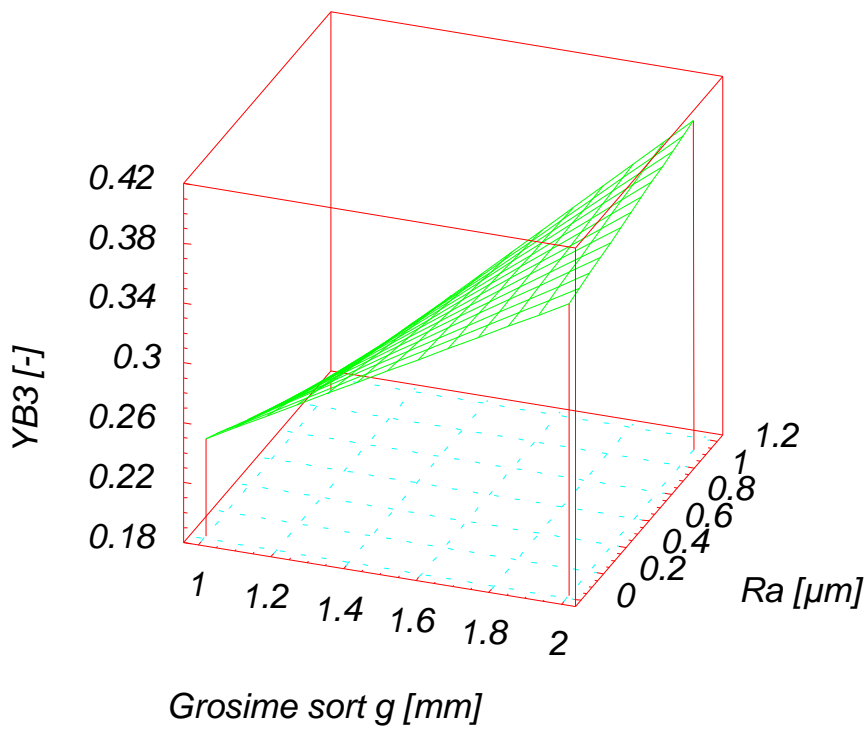


Figura 7.51. Influența rugozității materialului și a grosimi sortului de sticlă BK7 asupra funcției obiectiv Y_{B3}

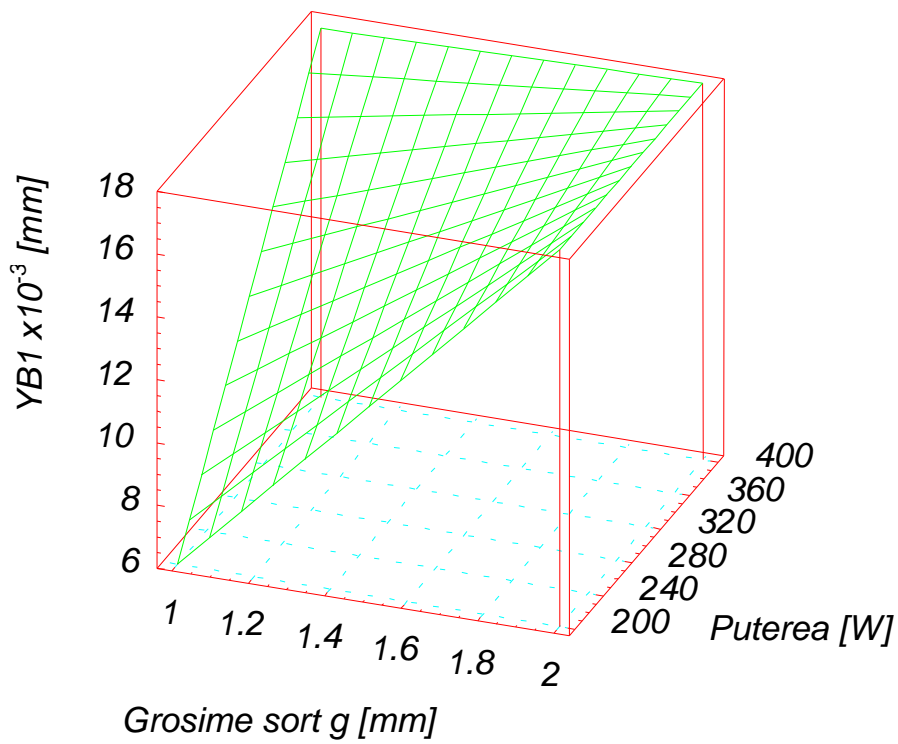


Figura 7.52. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

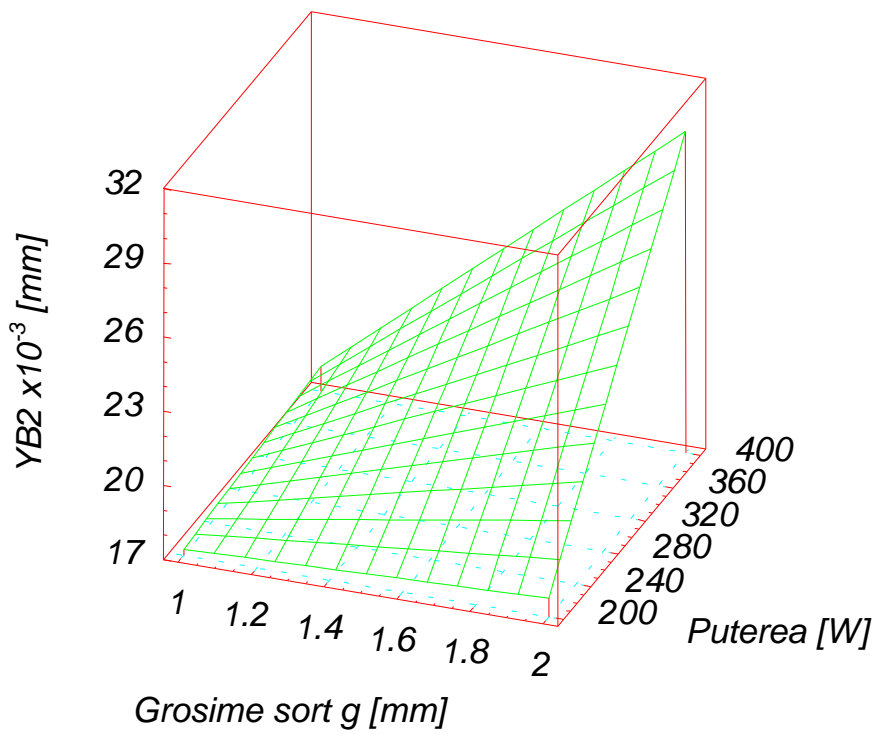


Figura 7.53. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

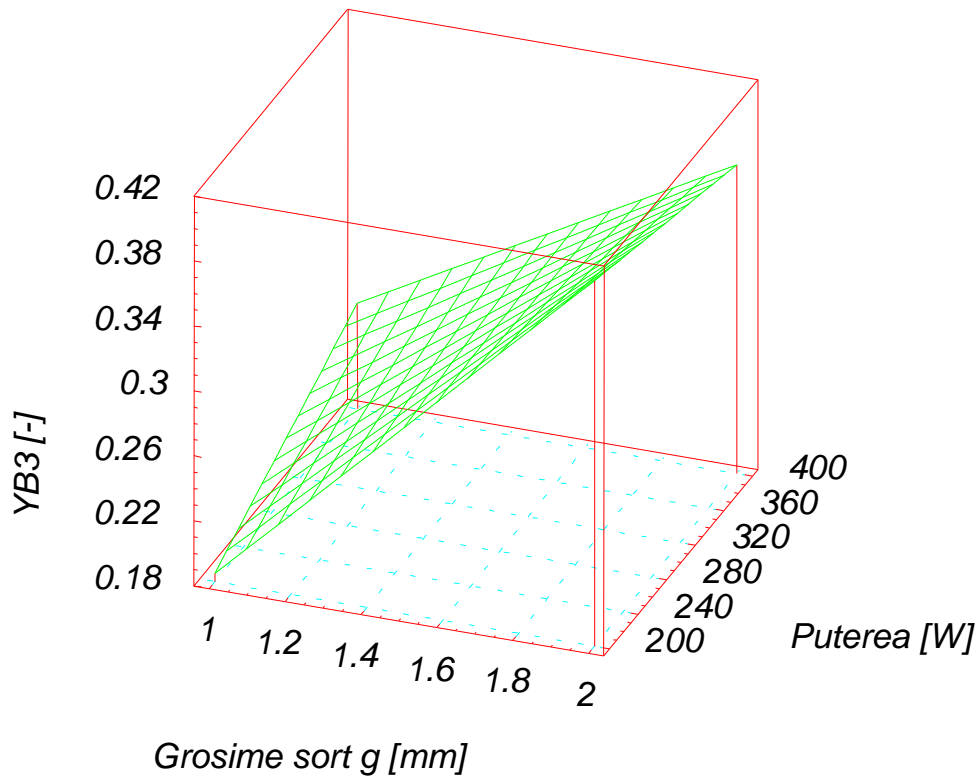


Figura 7.54. Influența grosimii materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Analizând curbele de răspuns de mai sus se poate observa influența celor trei factori: grosimea materialului prelucrat, rugozitatea acestuia și puterea radiației laser asupra funcțiilor obiectiv Y_{B1} , Y_{B2} și Y_{B3} . Astfel, pentru funcția obiectiv Y_{B1} (abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă), valori minime se înregistrează puteri relativ mici ale radiației laser dar și grosimi mici ale sorturilor de sticlă optică, respectiv rugozități mici ale materialului prelucrat (figurile 7.46, 7.49, 7.52).

În ceea ce privește influența celor trei factori asupra funcției obiectiv Y_{B2} – abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă, se remarcă că un minim al acesteia se înregistrează pentru valori mari ale rugozității piesei respectiv puteri mici ale radiației laser (figura 7.47), valori mici ale grosimii sorturilor de sticlă respectiv rugozități mici (figura 7.50) dar și pentru grosimi mici de material la puteri medii ale radiației laser (figura 7.53).

Abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă – Y_{B3} tinde spre valori minime atunci când: puterea radiației laser precum și rugozitatea materialului au

valori mari (*figura 7.48*), în situația în care rugozitatea este mare dar grosimea sortului prelucrat e mică (*figura 7.51*) sau atunci când atât puterea radiației cât și grosimea materialului au valori mici (*figura 7.54*).

Concluzii

În cazul celor două experimente care au fost aplicate pe același sort de sticlă (BK7) păstrându-se ca factor de influență constant doar modul de operare al radiației laser (continuu sau puls) se pot concluziona următoarele:

- abaterea de la circularitate la intrarea fascicului în piesă Y_{B1} , are valori mai mici pentru sorturile de sticlă prelucrate cu radiație laser în puls, fapt explicabil prin acțiunea de durată scurtă a fascicului asupra materialului și o topire respectiv vaporizare controlată a acestuia din zona supusă prelucrării.
- în ceea ce privește abaterea de la circularitate la ieșirea fascicului în piesă Y_{B2} , rezultatele sunt în mare parte comparabile dar se observă un minim al acestei funcții obiectiv pentru prelucrarea cu radiație laser în puls, la o putere a radiației de 400W, grosime de 1 mm a sortului de sticlă și rugozitate mică a materialului $Ra=0,02 \mu m$ (piesa prelucrată să fie transparentă).
- abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă – Y_{B3} , are valori mai omogene pentru prelucrarea cu radiație laser continuă, dar înregistrează valori mai mici pentru prelucrarea cu radiației laser în puls la grosimi mici de material.

Judecând însă după preciziile de estimare a modelelor matematice aplicate se poate spune că sub aspect general prelucrarea în regim de lucru continuu s-a apropiat mai mult de valorile estimate ale modelelor polinomiale decât prelucrarea cu radiație laser în puls.

Experimentul 3

Pentru cel de-al treilea experiment s-a păstrat ca parametru constant grosimea sorturilor de 1 mm iar ca FI variabili s-au ales: rugozitatea materialului, puterea radiației laser, modul de operare al fascicului laser precum și indicele de refracție al materialului. Astfel, s-a aplicat un experiment factorial complet 2^4 ce presupunea 16 încercări, pentru care s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului inferior și superior, precum și intervalele de variație ale FI, sintetizate în *tabelul 7.22*.

Tabelul 7.22. Alegerea domeniilor de variație a FI pentru experimentul factorial complet 2^4

Factorii de influență	Cod	x_{B3} [μm]	x_{B4} [W]	x_{B5} [-]	x_{B1} [-]
Nivelul zero	0	0,57	300	0,625	0,66
Intervalul de variație	ΔI	0,55	100	0,375	0,01
Nivelul superior	+1	1,12	400	1	0,67
Nivelul inferior	-1	0,02	200	0,25	0,65

Tabelul 7.23 Matricea program a experimentului factorial complet 2^4 analizat

Nr. încercare	Nivel factor de influență					Simbolizare	FO		
	x_0	x_{B3}	x_{B4}	x_{B5}	x_{B1}		$Y_{B1} \cdot 10^{-3}$	$Y_{B2} \cdot 10^{-3}$	Y_{B3}
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	28	30.5	0.343
2	1	1	-1	-1	-1	A	26	14	0.258
3	1	-1	1	-1	-1	B	4.5	3.5	0.281
4	1	1	1	-1	-1	Ab	14.5	2.5	0.251
5	1	-1	-1	1	-1	C	11	34.5	0.323
6	1	1	-1	1	-1	Ac	8.5	0	0.359
7	1	-1	1	1	-1	Bc	2.5	8.5	0.339
8	1	1	1	1	-1	Abc	7.5	11.5	0.282
9	1	-1	-1	-1	1	D	12	26	0.336
10	1	1	-1	-1	1	Ad	3.5	6.5	0.244
11	1	-1	1	-1	1	Bd	12	12	0.222
12	1	1	1	-1	1	Abd	24	28	0.224
13	1	-1	-1	1	1	Cd	9	11.5	0.343
14	1	1	-1	1	1	Acd	11.5	7	0.460
15	1	-1	1	1	1	Bcd	23.5	14.5	0.292
16	1	1	1	1	1	Abcd	34.5	28.5	0.376

Experimentul s-a efectuat pentru sorturile de sticlă TF101 și SF5 în condițiile în care modul de operare cu radiație laser a fost atât în regim continuu cât și pulsant.

Funcțiile de răspuns Y_{B1} , Y_{B2} , Y_{B3} au fost calculate cu ajutorul formulelor (7.1), (7.2) și respectiv (7.3).

În tabelul 7.23 este prezentată matricea program a experimentului factorial complet 2^4 cu 4 factori de influență.

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, determinându-se conform modelului matematic impus, următoarele:

- coeficienții de regresie pentru polinomul de gradul I (tabelul 7.24);
- influența FI și interacțiunile semnificative dintre factori;
- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației FO când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (figura 7.55);

- compararea valorilor măsurate cu cele estimate dată tabelar prin precizia de estimație pentru fiecare funcție obectiv în parte (*tabelul 7.25*);
- suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență (*figurile 7.57 - 7.74*).

Tabelul 7.24. Valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic analizat al celor trei FO

FO – Y _{B1}		FO – Y _{B2}		FO – Y _{B3}	
Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b ₀	4229,08	b ₀	2732,64	b ₀	2,82067
b ₁	-136,875	b ₁	-1078,67	b ₁	-4,74292
b ₂	-10,7016	b ₂	-8,94389	b ₂	0,0141497
b ₃	-1975,28	b ₃	393,506	b ₃	-7,57583
b ₄	-2526,48	b ₄	-1612,5	b ₄	-1,47697
b ₁₂	0,0551136	b ₁₂	0,121591	b ₁₂	2,61364·10 ⁻⁵
b ₁₃	1,36364	b ₁₃	0,30303	b ₁₃	0,116667
b ₁₄	73,8636	b ₁₄	625	b ₁₄	2,80682
b ₂₃	0,0708333	b ₂₃	0,068333	b ₂₃	1,16667·10 ⁻⁵
b ₂₄	6,40625	b ₂₄	5,3125	b ₂₄	-8,6875·10 ⁻⁴
b ₃₄	1175	b ₃₄	-250	b ₃₄	4,58333

Valorile coeficienților de regresie din *tabelul 7.24*, fac ca forma modelului matematic polinomial (7.4) pentru FO - Y_{B1}, Y_{B2} și Y_{B3} să devină:

$$Y_{B1} = 4229,08 - 136,875A - 10,7016B - 1975,28C - 2526,48D + 0,0551136AB + 1,36364AC + 73,8636AD + 0,0708333BC + 6,40625BD + 1175CD \quad (7.17)$$

$$Y_{B2} = 2732,64 - 1078,67A - 8,94389B + 393,506C - 1612,5D + 0,121591AB + 0,30303AC + 625AD + 0,068333BC + 5,3125BD - 250CD \quad (7.18)$$

$$Y_{B3} = 2,82067 - 4,74292A + 0,0141497B - 7,57583C - 1,47697D + 2,61364 \cdot 10^{-5}AB + 0,116667AC + 2,80682AD + 1,16667 \cdot 10^{-5}BC - 8,6875 \cdot 10^{-4}BD + 4,58333CD \quad (7.19)$$

Din cele trei histograme ale efectelor variabilelor independente asupra funcțiilor obiectiv Y_{B1}, Y_{B2} și Y_{B3}, prin eliminarea efectelor ne semnificative ale factorilor de influență, ecuațiile polinomiale ale modelelor matematice devin:

$$Y_{B1} = 4229,08 + 0,0551136AB + 0,0708333BC + 6,40625BD + 1175CD \quad (7.20)$$

$$Y_{B2} = 2732,64 - 1078,67A - 1612,5D + 0,121591AB + 625AD + 0,068333BC + 5,3125BD \quad (7.21)$$

$$Y_{B3} = 2,82067 + 0,0141497B - 7,57583C + 0,116667AC \quad (7.22)$$

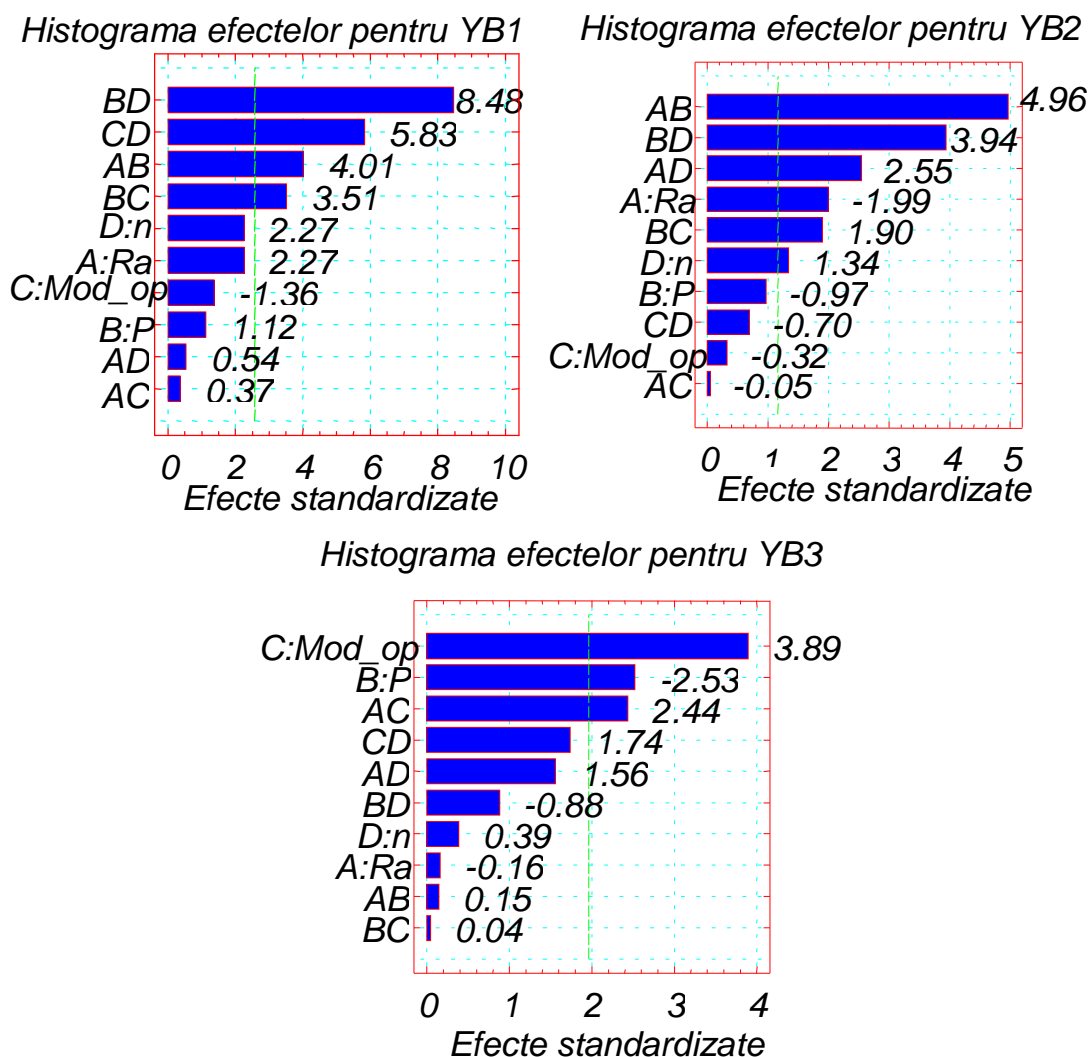


Figura 7.55. Histogramele efectelor variabilelor independente asupra FO

Pentru funcția obiectiv Y_{B1} , influențe semnificative au interacțiunile de ordinul doi dintre rugozitatea materialului (A) și puterea radiației laser (B), modul de operare al fasciculului laser (C) și puterea radiației laser (B), indicele de refracție al materialului (D) și puterea radiației laser (B) precum și dintre modul de operare al fasciculului laser (C) și indicele de refracție al materialului (D).

Asupra FO - Y_{B2} , au influențe semnificative atât variabilele independente (A) – rugozitatea materialului prelucrat și respectiv (D) – indicele de refracție al sortului de sticlă cât și, interacțiunile de ordinul doi (AB), (AD), (BC) și (BD).

Asupra FO - Y_{B3} , influențe semnificative au variabilele independente (B) – puterea radiației laser și respectiv (C) – modul de operare al fasciculului laser dar și interacțiunea de ordinul doi (AC).

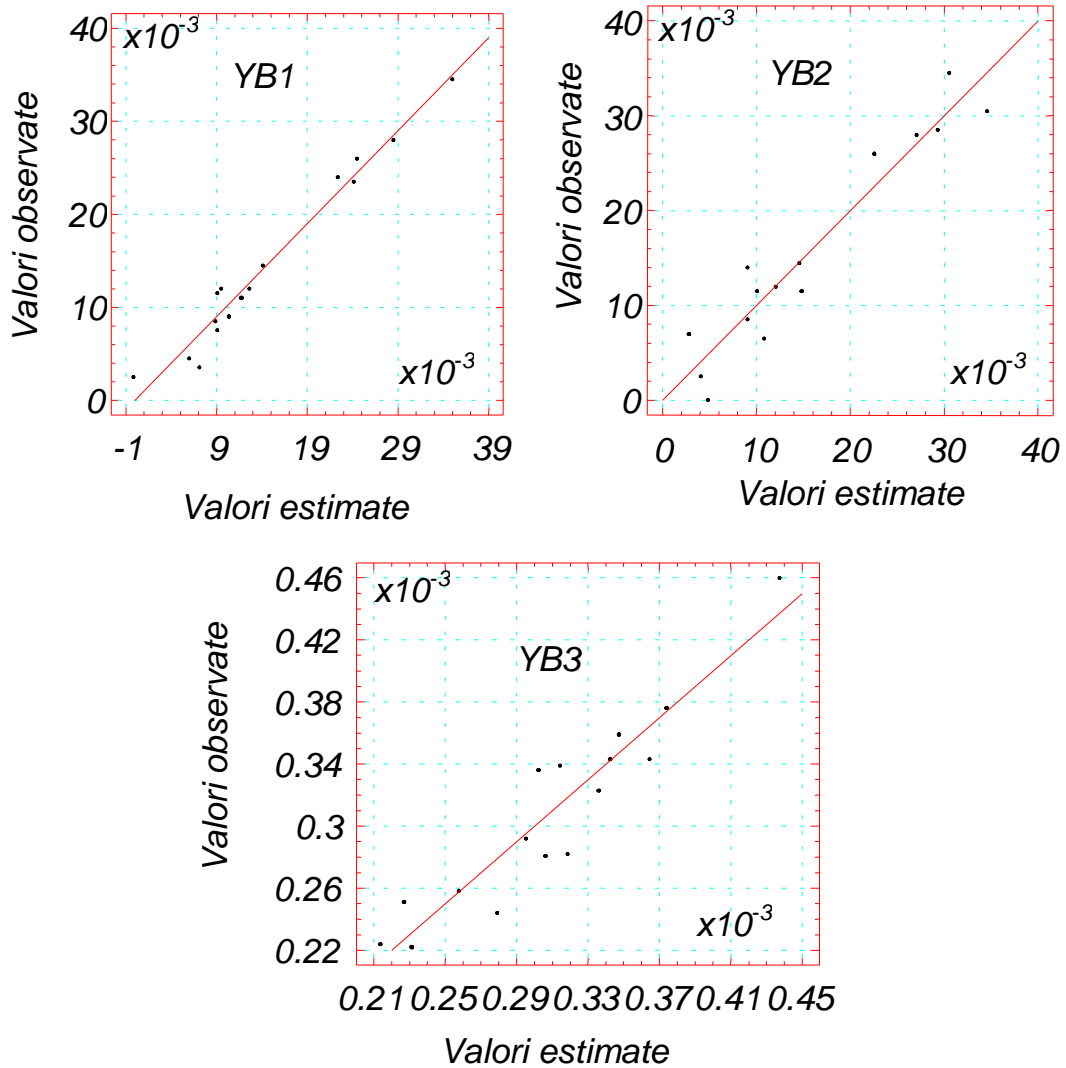


Figura 7.56. Reprezentarea grafică a preciziei de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv

Precizia de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv în parte este dată în tabelul 7.25. Se poate spune că există o concordanță relativ bună între valorile estimate cu ajutorul modelului polinomial adoptat și cele rezultate în urma experimentului observată și din graficele reprezentate în figura 7.56.

Tabelul 7.25. Precizia de estimare a modelului matematic analizat pentru cele trei FO

FO – Y _{B1}	FO – Y _{B2}	FO – Y _{B3}
Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]
96,73	92,95	90,15

În cele ce urmează vor fi prezentate curbele de răspuns ale tuturor combinațiilor dintre factorii de influență pentru a putea analiza influența factorilor

asupra celor trei funcții obiectiv alese pentru prelucrarea cu radiație laser a sorturilor de sticlă optică.

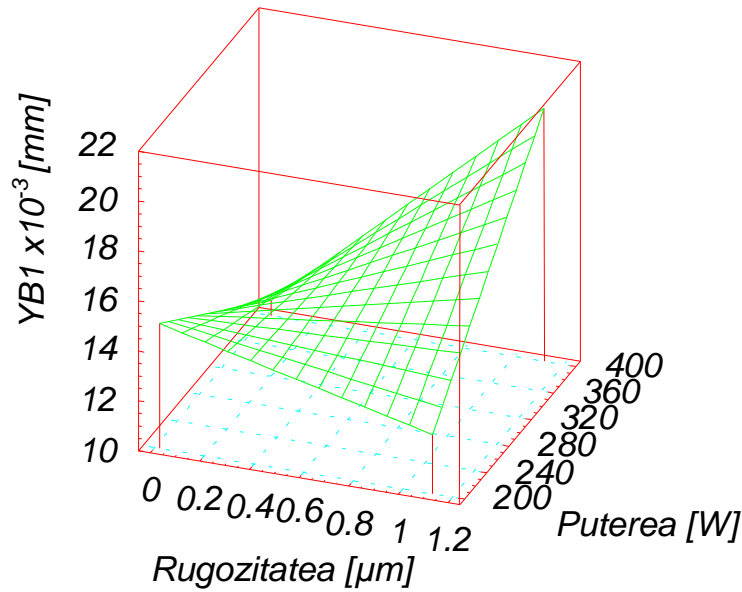


Figura 7.57. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

Graficul din figura 7.57, arată că abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă Y_{B1} , este mai mică pentru valori medii ale puterii radiației laser și rugozități medii ale materialului prelucrat.

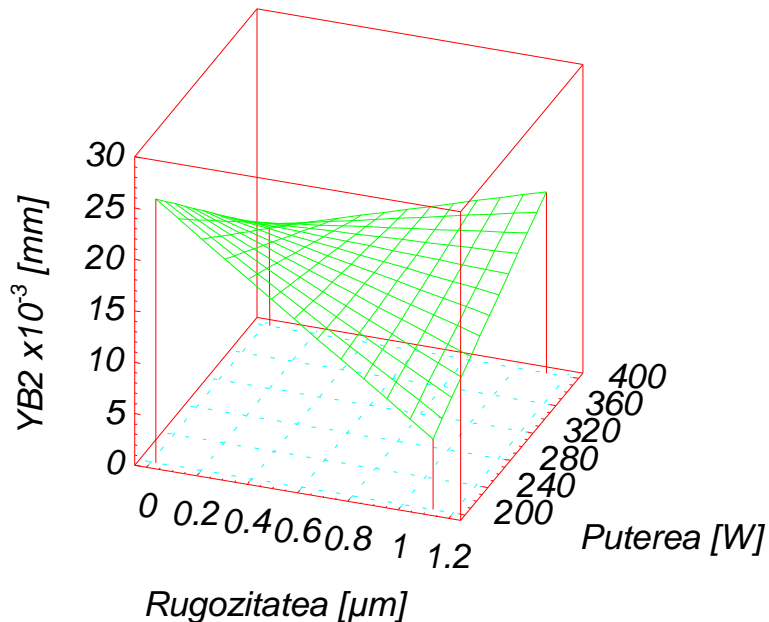


Figura 7.58. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

Abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din sorturile de sticlă optică înregistrează valori mici pentru puteri mici ale radiației laser la rugozități mari ale eșantionului prelucrat (conform figurii 7.58).

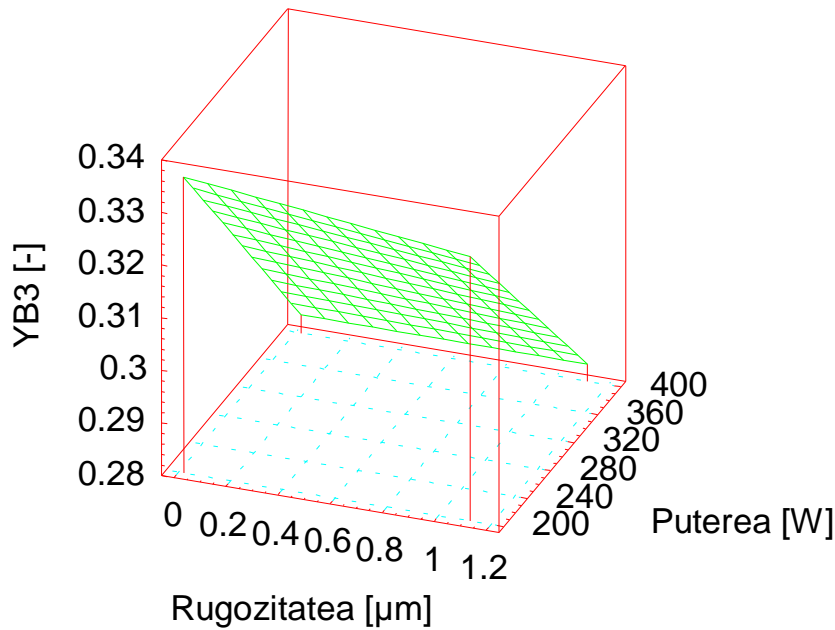


Figura 7.59. Influența rugozității materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

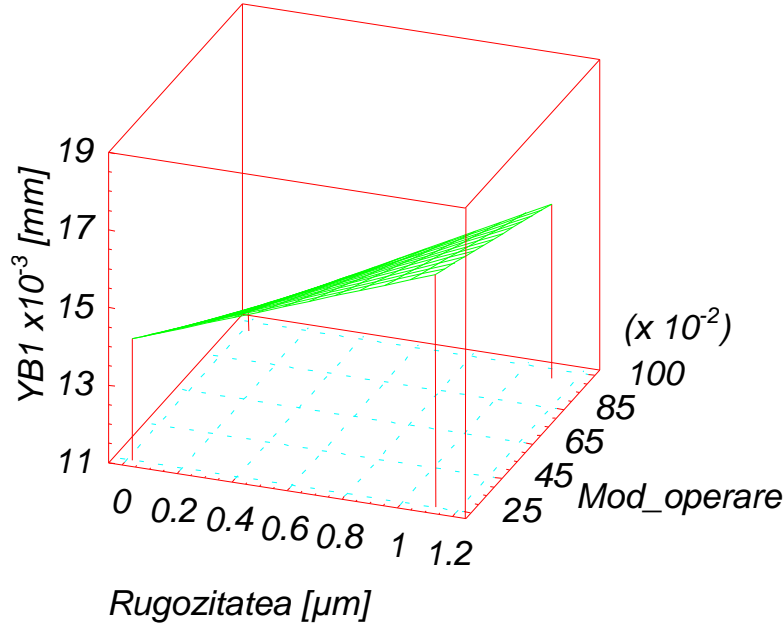


Figura 7.60. Influența rugozității materialului și a modului de operare al fasciculului laser (cw, pw) asupra funcției obiectiv Y_{B1}

Din graficul prezentat în figura 7.59, se poate vedea că rugozitatea materialului nu are o influență semnificativă asupra FO – Y_{B3} (abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă), în cazul în care puterea rămâne constantă. Dacă puterea

radiației laser crește, se remarcă o scădere a valorii funcției obiectiv Y_{B3} pentru valoare constantă a rugozității materialului supus prelucrării.

În figura 7.60, se disting valori mici ale FO – Y_{B1} pentru valori mici ale rugozității materialului și mod de operare continuu al fasciculului laser.

Abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din eșantionul de sticlă are valori mici pentru rugozități mari ale materialului și pentru modul de prelucrare în regim continuu (figura 7.61).

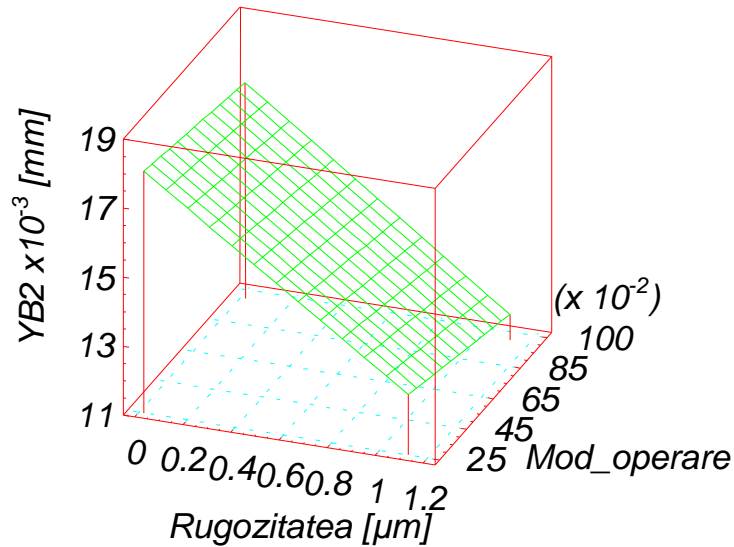


Figura 7.61. Influența rugozității materialului și a modului de operare al fasciculului laser (cw, pw) asupra funcției obiectiv Y_{B2}

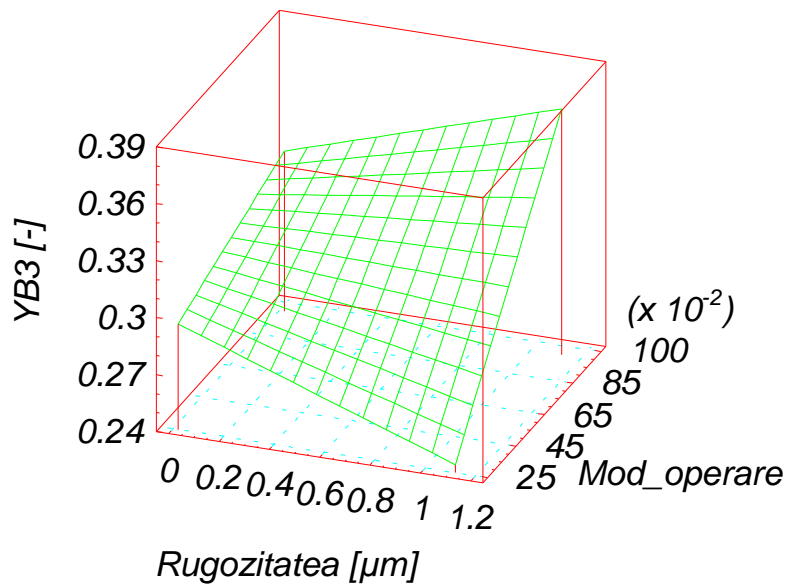


Figura 7.62. Influența rugozității materialului și modului de operare al fasciculului laser (cw, pw) asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Pentru aceeași influență se pot observa valori minime ale funcției obiectiv Y_{B3} atunci când rugozitatea are valori mari iar modul de operare al fasciculului laser este în regim pulsant (figura 7.62).

Pentru abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă Y_{B1} , putem spune conform figurii 7.63 că obținem valori minime ale acesteia pentru valori mici ale celor doi factori de influență – rugozitatea sorturilor de sticlă optică și respectiv indicele de refracție al materialului.

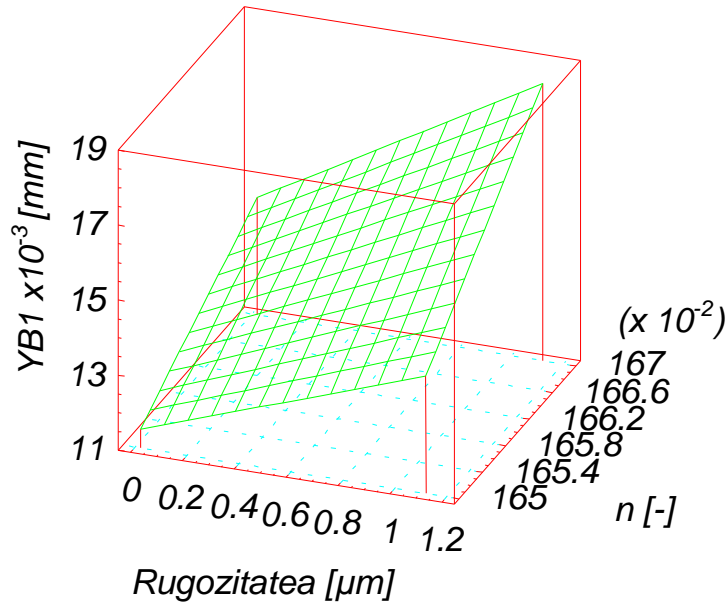


Figura 7.63. Influența rugozității materialului și a indicelui de refracție asupra funcției obiectiv Y_{B1}

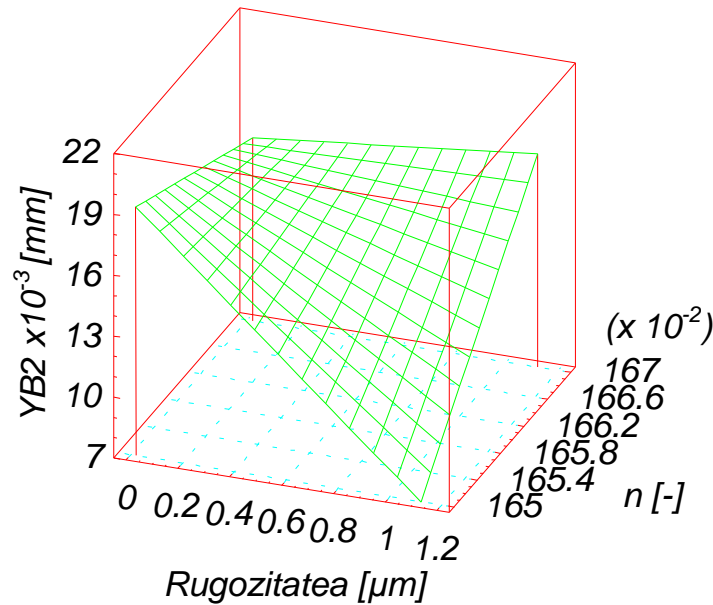


Figura 7.64. Influența rugozității materialului și a indicelui de refracție asupra funcției obiectiv Y_{B2}

Pentru abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă Y_{B2} , se observă (figura 7.64) că pentru valori mari ale rugozității sorturilor de sticlă optică și respectiv valori mici ale indicelui de refracție al materialului, obținem valori minime ale funcției obiectiv analizate.

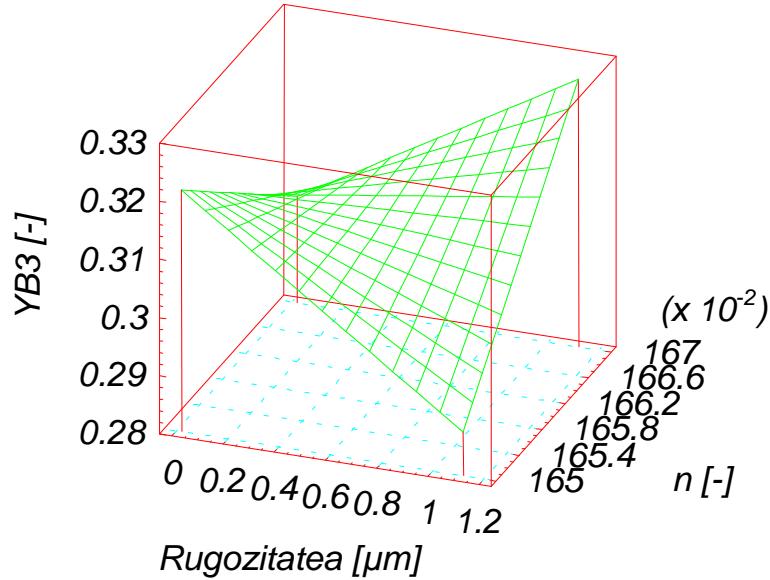


Figura 7.65. Influența rugozității materialului și a indicelui de refracție asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Conform figurii 7.65, abaterea de la cilindricitate Y_{B3} va avea valori mai mici pentru valori mari ale rugozității sorturilor de sticlă și respectiv indice de refracție al materialului mic.

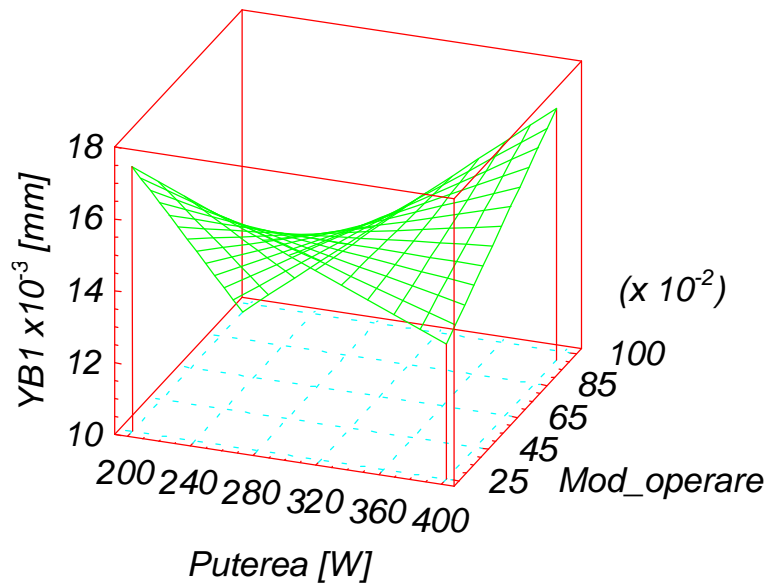


Figura 7.66. Influența modului de operare al fasciculului laser (cw, pw) și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

Pentru modul de operare al fascicului laser în regim continuu și respectiv pentru puteri mici ale radiației laser, se observă conform *figurii 7.66* că valoarea funcției obiectiv Y_{B1} tinde spre valori minime.

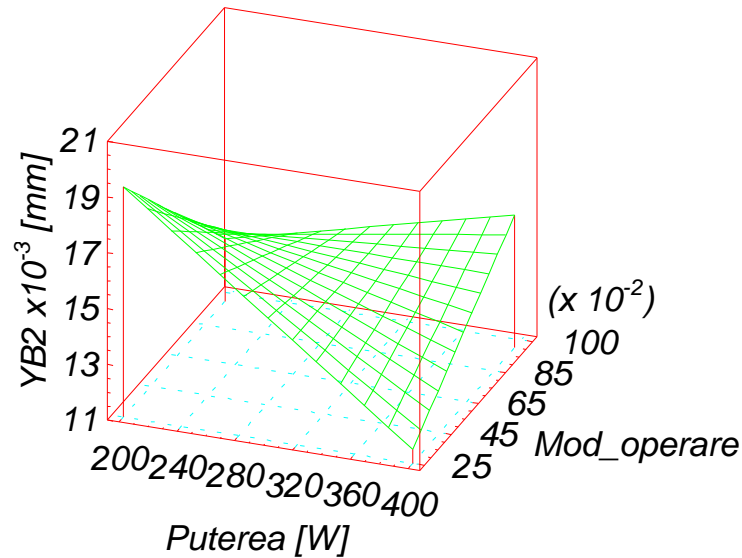


Figura 7.67. Influența modului de operare al fascicului laser (cw, pw) și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

În această situație funcția obiectiv Y_{B2} tinde spre valori minime atunci când puterea radiației laser are valori mari iar modul de operare al fascicului laser este în regim pulsant *figura 7.67*. Aceasta înseamnă de fapt că puterea radiației laser este mai mică decât cea fizic aplicată deoarece ea se reduce trecând de la modul de operare continuu la cel pulsant.

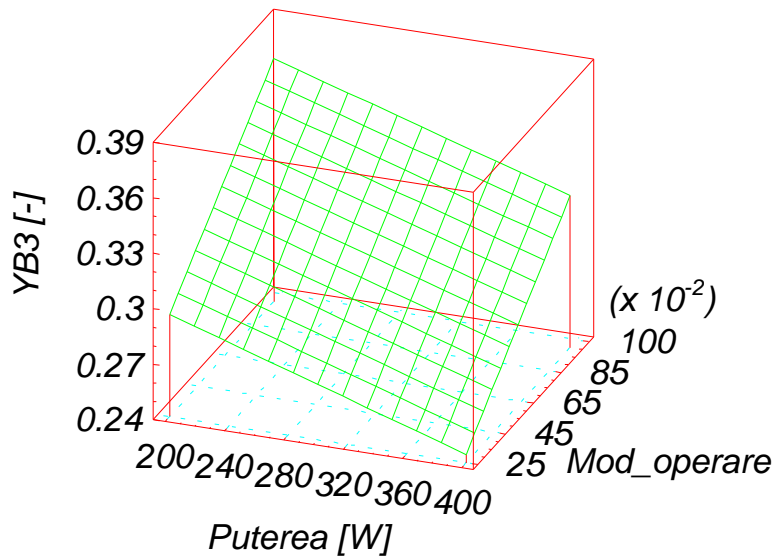


Figura 7.68. Influența modului de operare al fascicului laser (cw, pw) și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Valori minime ale funcției obiectiv Y_{B3} se pot observa atunci când puterea radiației laser are valori mari iar modul de operare al fasciculului laser este în regim pulsant (figura 7.68). Și în acest caz puterea radiației se reduce tocmai prin modul de operare al fasciculului care lasă să treacă doar o parte a radiației laser aplicate asupra eșantionului de prelucrat, corespunzătoare chopper-ului folosit la prelucrarea cu radiație laser.

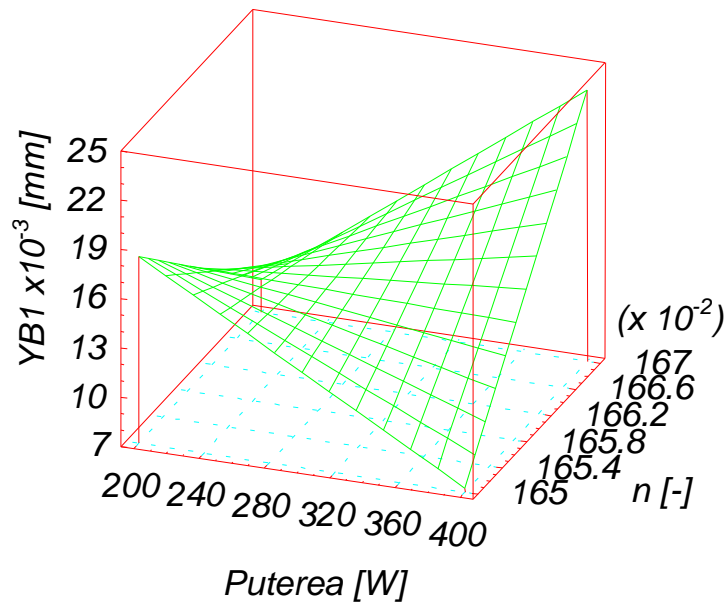


Figura 7.69. Influența indicelui de refracție al materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B1}

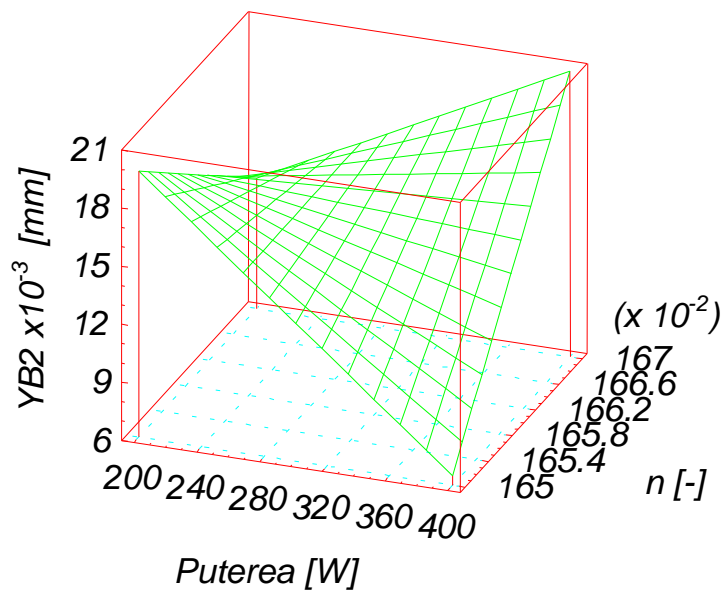


Figura 7.70. Influența indicelui de refracție al materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2}

Din figura 7.69 se observă că valori minime înregistrate pentru funcția obiectiv Y_{B1} apar atunci când puterea radiației laser are valori mari iar indicele de refracție al materialului prelucrat este mic.

Figura 7.70 reprezintă influența celor doi factori: indicele de refracție al materialului și respectiv puterea radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2} . Astfel se disting valori minime ale FO pentru puteri mari ale radiației laser și respectiv valori mici ale indicelui de refracție al sorturilor de sticlă optică.

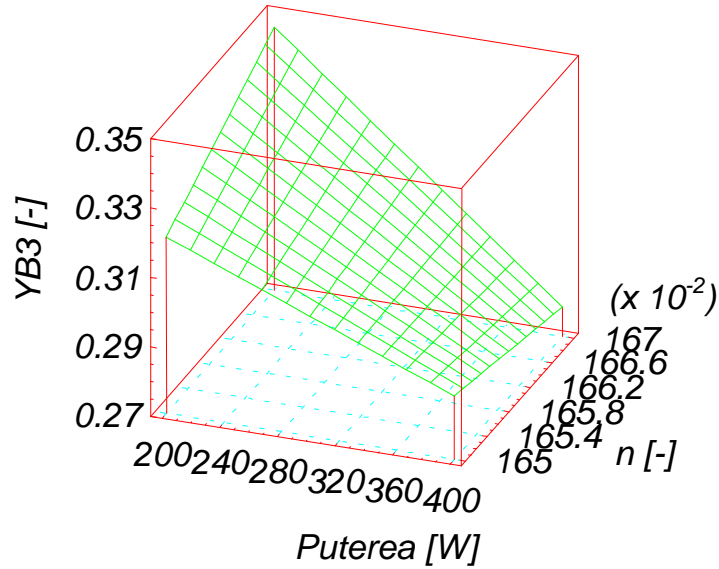


Figura 7.71. Influența indicelui de refracție al materialului și a puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3}

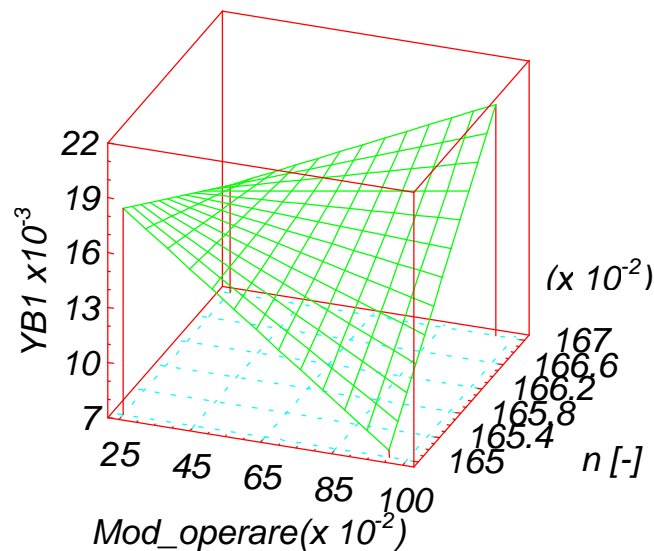


Figura 7.72. Influența modului de operare al fasciculului laser (cw, pw) și a indicelui de refracție al materialului asupra funcției obiectiv Y_{B1}

În ceea ce privește influența indicelui de refracție și puterii radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3} (figura 7.71), se poate vedea din grafice că valorile

minime ale FO se obțin pentru valori mari ale indicelui de refracție al materialului și respectiv ale puterii radiației laser. La puteri prea mici, creșterea indicelui de refracție face ca valoarea funcției obiectiv să crească nedorit pentru procesul de prelucrare studiat.

Pentru valori mici ale indicelui de refracție și modul de operare al radiației laser în regim continuu, s-au înregistrat valori minime ale funcției obiectiv Y_{B1} (figura 7.72). Se poate observa că dacă pentru modul de operare continuu indicele de refracție crește, cresc nedorit și valorile funcției obiectiv analizate. Același lucru se întâmplă și pentru modul de operare pulsant al radiației laser la valori mici ale indicelui de refracție.

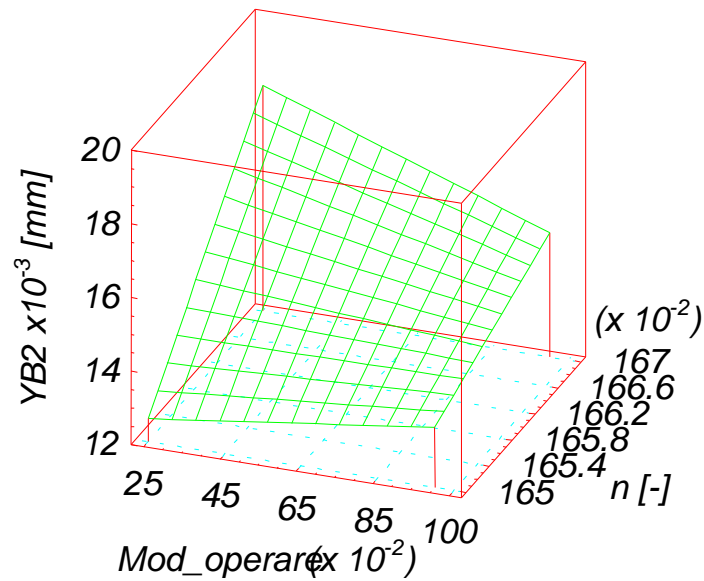


Figura 7.73. Influența modului de operare al fascicului laser (cw, pw) și a indicelui de refracție al materialului asupra funcției obiectiv Y_{B2}

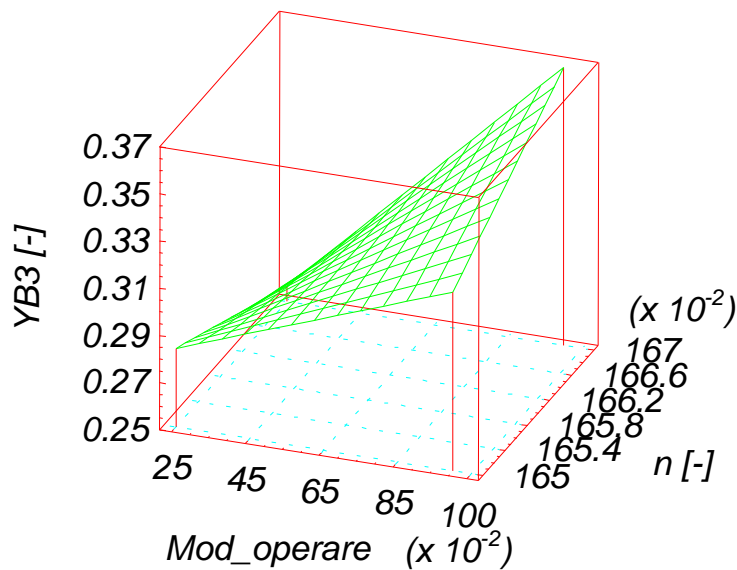


Figura 7.74. Influența modului de operare al fascicului laser (cw, pw) și a indicelui de refracție al materialului asupra funcției obiectiv Y_{B3}

Analizând influența indicelui de refracție și a modului de operare al radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B2} (figura 7.73), se remarcă o valoare minimă a acesteia pentru modul de operare pulsant al radiației laser și respectiv valori mici ale indicelui de refracție al materialului.

În ceea ce privește influența indicelui de refracție și modul de operare al radiației laser asupra funcției obiectiv Y_{B3} (figura 7.74), o valoare minimă a acesteia se obține pentru valori mari ale indicelui de refracție atunci când radiația laser lucrează în regim pulsant.

Concluzii

Cel de-al treilea experiment a fost aplicat pe sorturile de sticlă flint SF5 și TF101 de grosime 1 mm, pentru care factorii de influență au fost: rugozitatea materialului, puterea radiației laser, modul de operare al fasciculului laser și indicele de refracție al sorturilor de sticlă optică. În condițiile de lucru anterior menționate influența FI asupra celor trei FO poate fi sistematizată după cum urmează:

- abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă Y_{B1} , are valori mai mici pentru sorturile de sticlă prelucrate cu radiație laser continuă, care au rugozitate mică (ce tinde spre suprafețe lucioase ale materialului), respectiv indice de refracție mic (în această ordine - BK7, TF101, SF5). Puterea radiației laser variază necesitând valori mici pentru modul de lucru pulsant dar valori mari pentru proprietățile caracteristice ale materialului, rugozitate și indice de refracție care trebuie să fie mici.
- în ceea ce privește abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului în piesă Y_{B2} , se observă valori minime ale acestei funcții obiectiv pentru sorturi de sticlă optică cu rugozități mari și indice de refracție mic. Puterea radiației laser trebuie să aibe valori mari pentru valori mici ale indicelui de refracție al materialului și prelucrarea să se realizeze în regim de lucru pulsant, iar pentru rugozități mari ale materialului puterea radiației laser poate să fie mică dacă se lucrează în regim continuu.
- abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă – Y_{B3} , are valori minime pentru prelucrarea cu radiație laser în puls, la rugozități mari ale materialului prelucrat, puteri mari ale radiației laser, respectiv valori mari ale indicelui de refracție (sortul de sticlă SF5).

Toate aceste aspecte ale prelucrării cu radiație laser pentru cele trei sorturi de sticlă optică vor fi mai bine analizate în *subcapitolul 7.3.2.2.* în care se tratează interacțiunea radiației laser asupra materialului optic în zona influențată termic.

7.3.2.2. Analiza efectelor induse de radiația laser în sorturile de sticlă optică în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser efectuată pe instalația laser cu CO₂ GT-1200 de la IFTAR București

Așa cum se cunoaște deja, la interacțiunea dintre radiația laser și sorturile de sticlă optică prelucrate prin operația de găurire, prelevarea de material se realizează predominant prin vaporizare (caracter volumic al absorbției energiei radiației laser) și doar parțial prin topire datorită fenomenelor de conducție termică. În urma prelucrărilor efectuate pe cele trei sorturi de sticlă s-a putut remarca că toți factorii care au intervenit în procesul de prelucrare au avut influențe asupra funcțiilor obiectiv analizate, forma alezajelor obținute fiind extrem de sensibilă la modificarea acestora. De asemenea s-a putut efectua o analiza calitativă asupra aspectului prelucrării în zona influențată termic (ZIT) și a dimensiunii acesteia pentru cele trei sorturi optice prelucrate. Pentru înțelegerea facilă a tuturor acestor aspecte se propune analizarea efectelor induse de radiația laser în sorturile de sticlă optică pe baza unor imagini obținute cu ajutorul unui aparat de fotografiat cu factor de mărire de 27x.

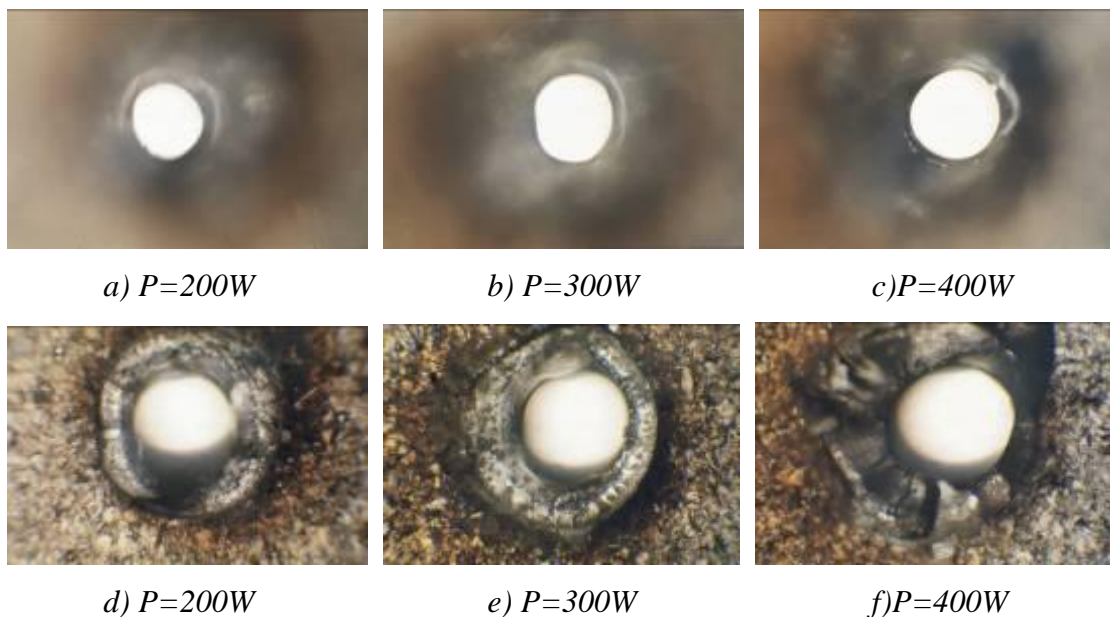


Figura 7.75. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 1,12 \mu\text{m}$ pentru regimul de lucru continuu

Analizând imaginile din *figura 7.75*, putem vedea influența clară a puterii asupra diametrului la ieșirea fasciculului din piesă (*a*), (*b*), (*c*), precum și la intrarea fasciculului în piesă (*d*), (*e*), (*f*), care se mărește odată cu creșterea puterii radiației laser. De asemenea se poate remarca o zonă influențată termic (ZIT) mai mare, cu aspect neregulat, pentru puteri mai mari ale radiației laser și cu fisuri dispuse radial, dar numai la intrarea fasciculului în piesă (*d*), (*e*), (*f*). La ieșirea fasciculului din piesă, după ce amorsarea radiației laser în obiectul de prelucrat a avut loc, aspectul general al piesei este bun, cu suprafețe curate lipsite de fisuri.

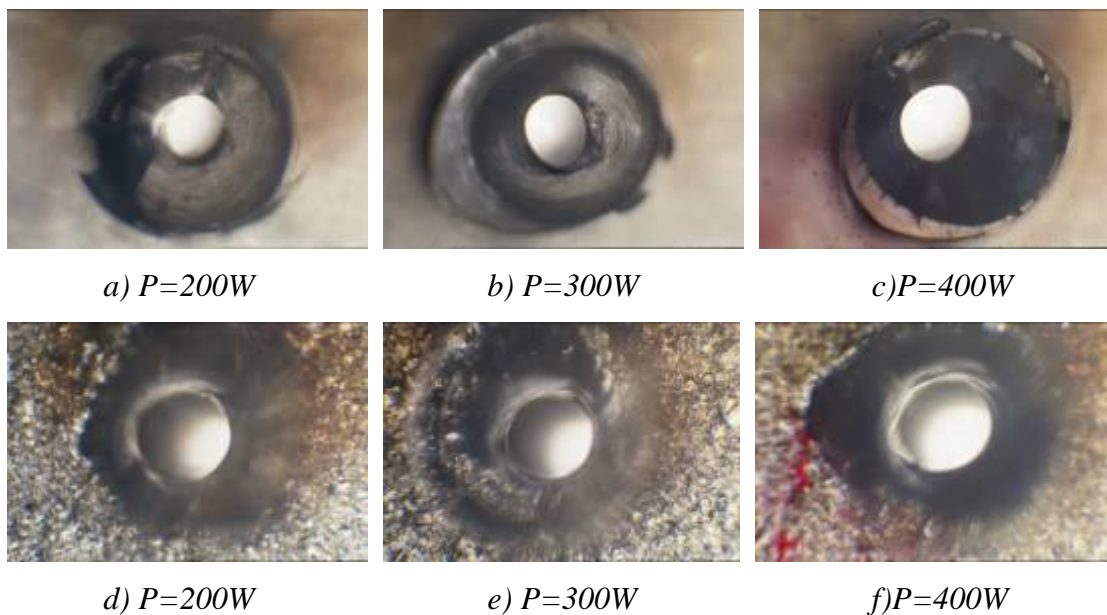


Figura 7.76. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1,5 mm grosime și rugozitate $R_a = 1,12 \mu\text{m}$ pentru regimul de lucru continuu

Pentru grosimi mai mari de material (*comparație între imaginile din figura 7.75 și figura 7.76, pentru același sort BK7 și același regim de lucru – continuu*) se remarcă alezaje de dimensiuni mai mici atât la ieșirea fasciculului (*a*), (*b*), (*c*), cât și la intrarea fasciculului în piesă (*d*), (*e*), (*f*), deoarece de aceasta dată este necesară o absorbție mai mare de energie a radiației laser care să declanșeze prelucrarea. Și în acest caz creșterea puterii radiației laser face ca dimensiunile alezajelor să crească în diametru. Referitor la ZIT aceasta este mai mare decât la sortul BK7 de grosime mai mică, având dimensiuni comparabile atât la intrarea fasciculului în piesă cât și la ieșirea acestuia din material și o dispunere radială relativ uniformă în ambele situații. În toate cazurile anterioare precum și în cele ce vor urma se poate vedea că în ZIT, indicele de refracție se modifică, transmitanța materialului optic în acea zonă fiind

diferită de cea a materialului de același fel neprelucrat. Adiacent zonei influențate termic se remarcă de cele mai multe ori o ușoară colorare (maronie) datorată carbonizării elementelor chimice care intră în compoziția acestor sorturi și care este mai ușor vizibilă la eșantioanele cu rugozitate mai mică (figurile 7.79, 7.80 și 7.81).

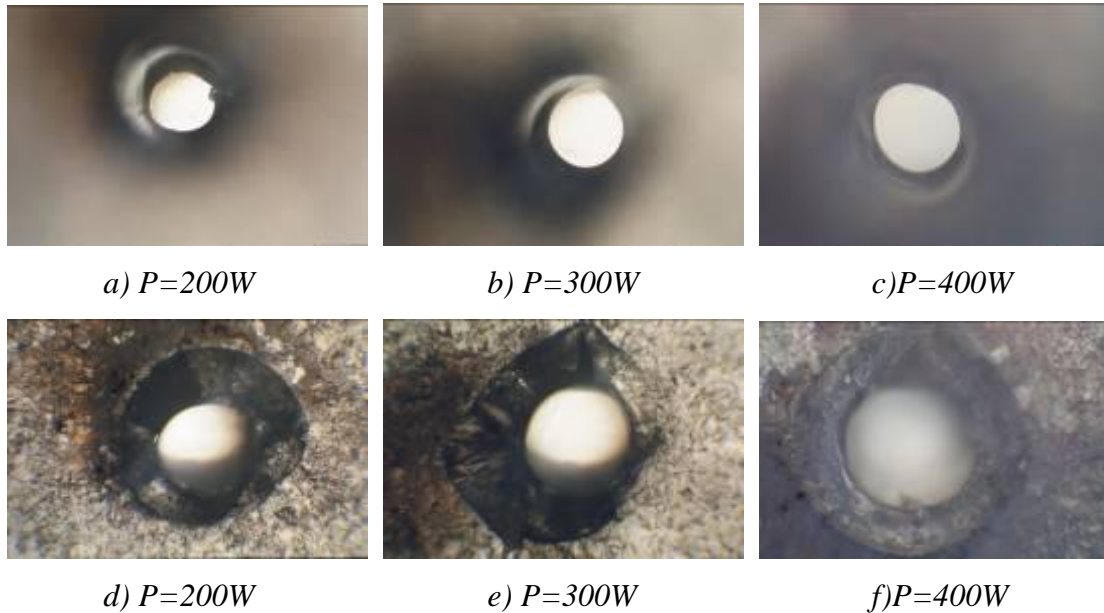


Figura 7.77. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă SF5 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 1,12 \mu\text{m}$ pentru regimul de lucru continuu

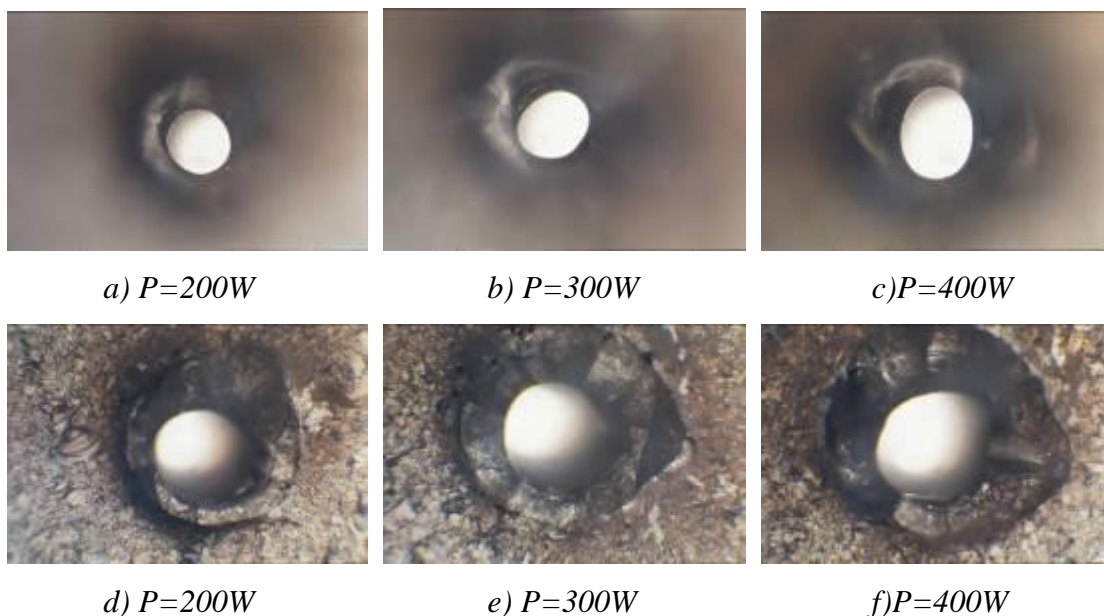


Figura 7.78. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă TF101 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 1,12 \mu\text{m}$ pentru regimul de lucru continuu

Din figurile 7.85, 7.77 și 7.78, se poate analiza influența sorturilor de sticlă optică respectiv a indicelui de refracție asupra procesului de prelucrare prin găurire cu radiație laser de lungime de undă $10,6 \mu\text{m}$. Astfel, la aceeași grosime a sorturilor,

aceeași rugozitate a materialului, aceleași puteri ale radiației laser și la prelucrare în regim de lucru continuu, se observă că alezajele prelucrate au dimensiuni mai mici pentru indice de refracție mai mic (sortul BK7). Aspectul în ZIT este comparabil pentru cele trei sorturi de sticlă optică dispunerea acestora fiind circulară și mai neregulată pentru sorturile de tip flint decât la sortul BK7.

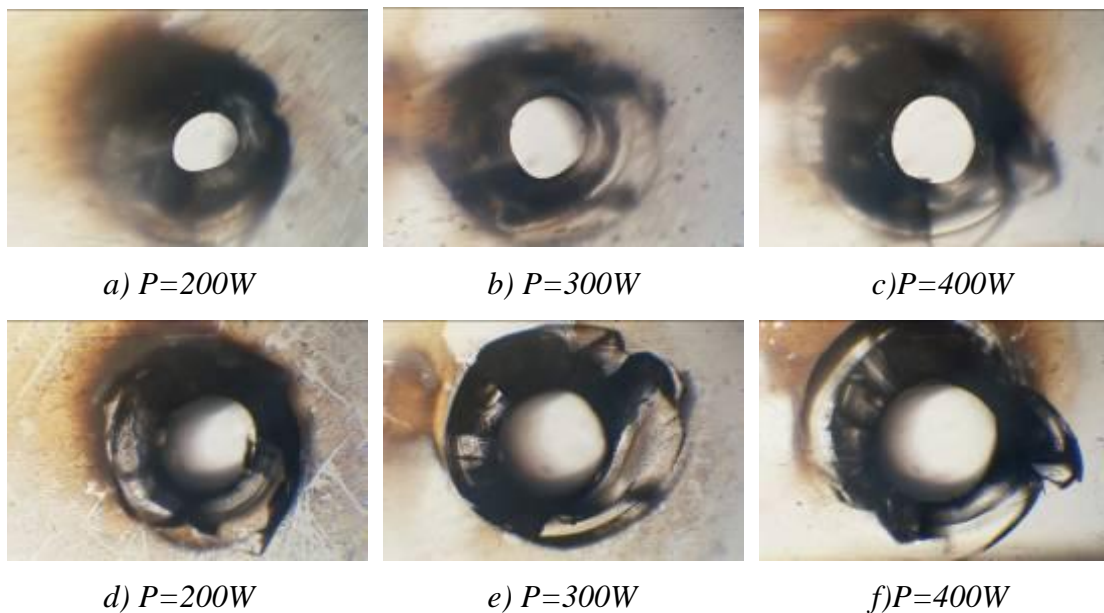


Figura 7.79. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă TF101 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu m$ pentru regimul de lucru continuu

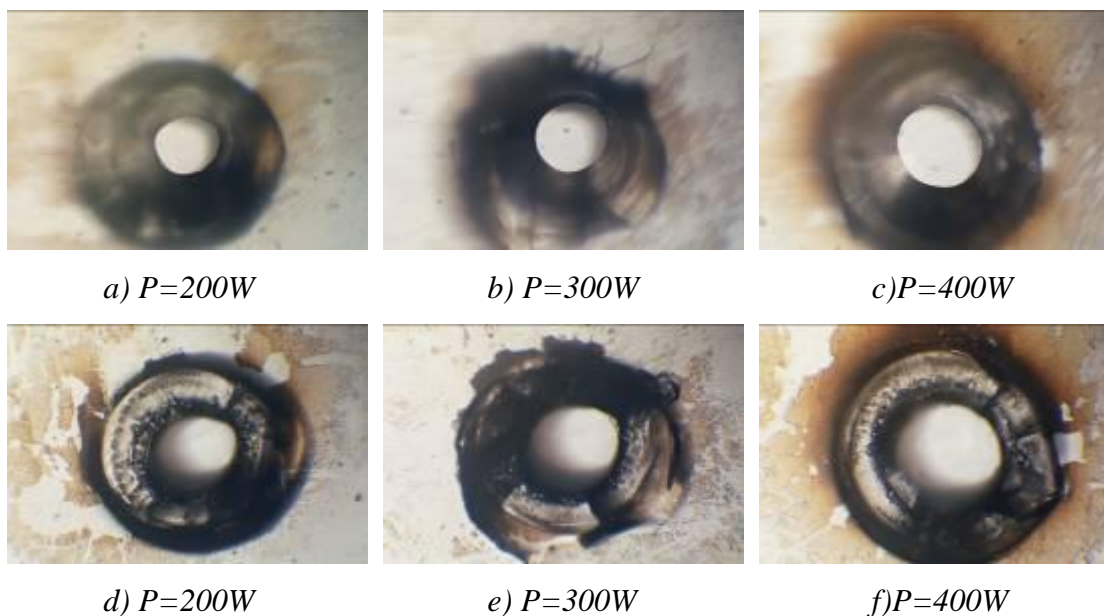


Figura 7.80. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă TF101 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu m$ pentru regimul de lucru pulsant

În ceea ce privește modul de operare al fasciculului laser în regim de lucru continuu sau puls se remarcă pentru sortul de sticlă optică TF101 (*figurile 7.79 și 7.80*) că alezajele prelucrate au dimensiuni mai mici pentru regimul de lucru pulsat. Zona influențată termic pentru modul de lucru continuu este mai mare și mai neregulată prezentând fisuri dispuse circular. La modul de lucru pulsat fisurile sunt mai mici și sunt dispuse preponderent radial. Aceste aspecte sunt observate doar la intrarea fasciculului laser în eșantioanele de sticlă optică (*d*), (*e*), (*f*).

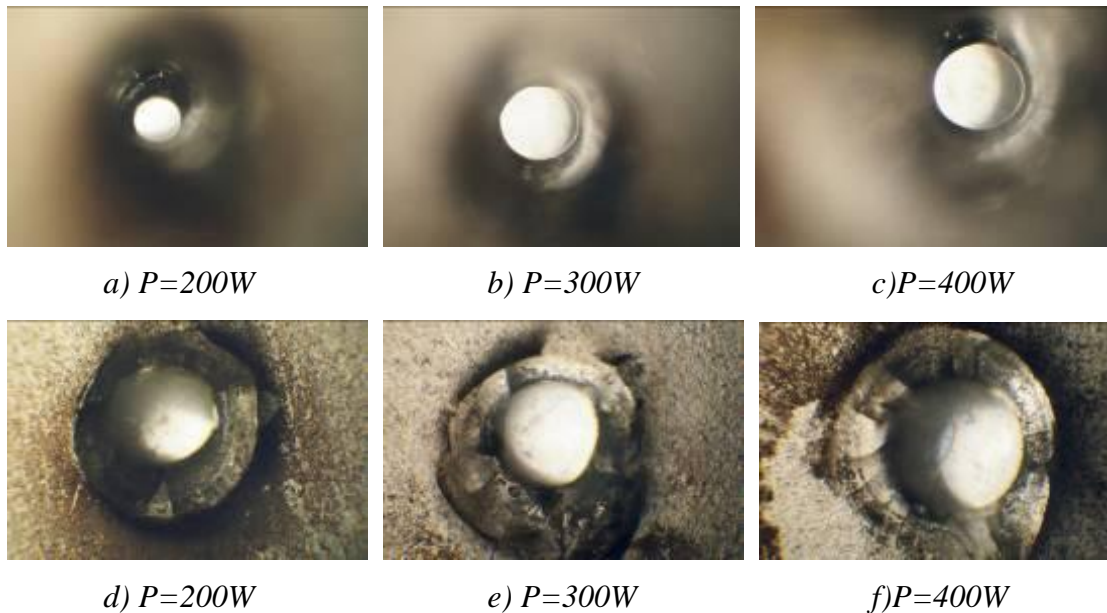


Figura 7.81. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă TF101 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,57 \mu m$ pentru regimul de lucru continuu

Pentru influența rugozității materialului prelucrat s-au analizat *figurile 7.78, 7.79 și 7.81*, pentru sortul de sticlă TF101 de grosime 1 mm, prelucrat în regim de lucru continuu a radiației laser. Se observă că dimensiunile alezajelor cresc odată cu creșterea rugozității atât la intrarea fasciculului în piesă (*d*), (*e*), (*f*) cât și la ieșirea acestuia din materialul prelucrat (*a*), (*b*), (*c*). Deasemenea colorarea materialului prelucrat în apropierea ZIT este mai pronunțată pentru sortul cu rugozitate mai mică, deoarece coeficientul de absorbție al radiației laser în piesă este mai mic și astfel este necesară o densitate de energie mai mare pentru amorsarea radiației laser.

Sub aspect general se poate menționa că sortul de sticlă BK7 s-a comportat mai bine decât sorturile de tip flint (SF5 și TF101) la prelucrarea prin găurire cu radiație laser.

7.3.3. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu CO₂ TER din Franța

În cazul cercetărilor experimentale efectuate pe instalația laser cu CO₂ TER s-a pornit de la experiența acumulată la prelucrarea prin găurire cu radiație laser pe instalația laser cu CO₂ GT 1200. Deoarece sortul de sticlă optică BK7 cu rugozitate mai mică a avut un comportament mai bun la prelucrarea prin găurire cu radiație laser s-a hotărât ca doar acesta să fie prelucrat pe instalația laser cu CO₂ TER.

Experimentele preliminare realizate precum și informațiile deținute pe cale bibliografică au dus la identificarea următorilor factori de influență semnificativi (din cei C₁-C₁₀ factori de influență conform tabelului 7.4) asupra funcțiilor obiectiv analizate:

- C₁ – frecvența radiației laser F (10, 15, 20 Hz)
- C₂ – timpul de acționare al FL - T_{tr} (0,4; 0,7; 1 s)
- C₃ – debitul gazului de lucru – aer comprimat (5, 10, 15 dm³/min)
- C₄ – poziția planului focal față de piesă - h_f (-1, 0, 1 mm)

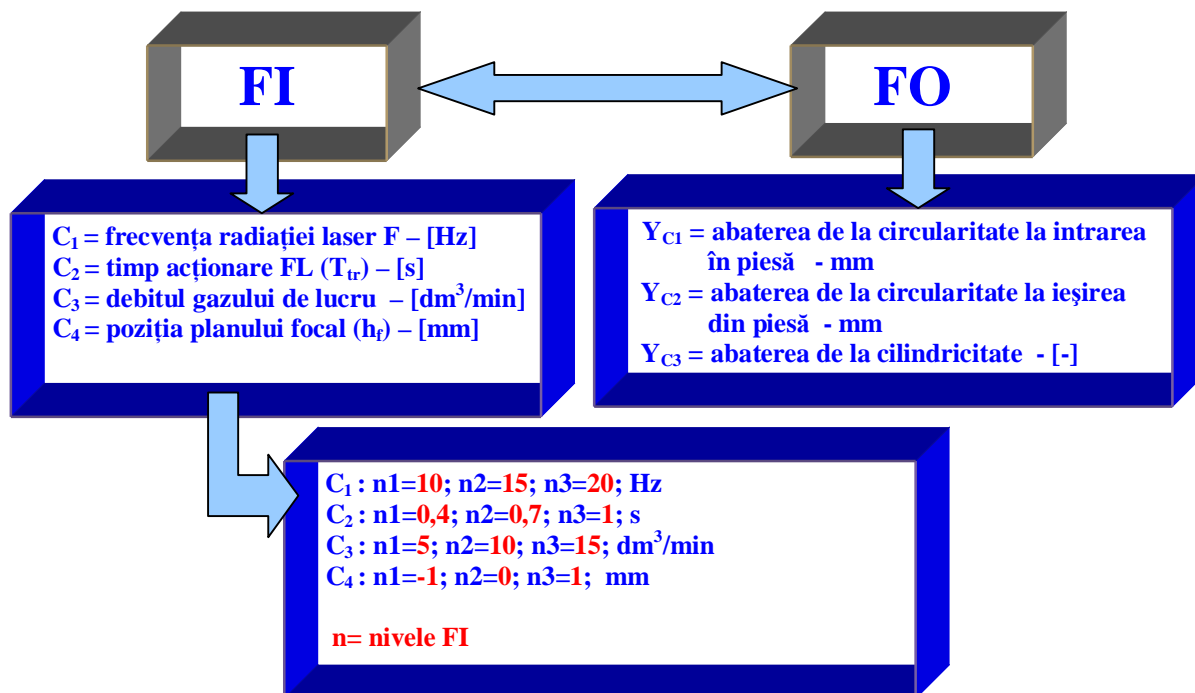


Figura 7.82. Factorii de influență și funcțiile obiectiv la prelucrarea prin găurire cu radiație laser pe instalația laser cu CO₂ TER din Franța

Toate prelucrările au fost efectuate la o putere de 155W și respectiv o tensiune maximă de încărcare a sistemului de pompaj de 10V.

Ținând cont de FO și de FI reprezentativi pentru acest proces de prelucrare, s-a optat în această situație pentru un experiment factorial central compus 2^4 -stea ce presupune 26 de încercări. Analiza dispersională aplicată experimentului a fost aplicată cu ajutorul programului STATGRAPHICS.

Astfel, pentru experimentul factorial propus s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului inferior și superior, precum și intervalele de variație ale FI, sintetizate în *tabelul 7.26*.

Tabelul 7.26. Alegerea domeniilor de variație a FI pentru experimentul factorial compus 2^4 -stea

Factorii de influență	Cod	x_{C1} [Hz]	x_{C2} [s]	x_{C3} [dm ³ /min]	x_{C4} [mm]
Nivelul zero	0	15	0,7	10	0
Intervalul de variație	ΔI	5	0,3	5	1
Nivelul superior	+1	20	1	15	1
Nivelul inferior	-1	10	0,4	5	-1
Braț pozitiv	$+\alpha$	25	1,3	20	2
Braț negativ	$-\alpha$	5	0,1	0	-2

Funcțiile de răspuns Y_{C1} , Y_{C2} , Y_{C3} au fost calculate cu ajutorul formulelor (7.1), (7.2) și respectiv (7.3).

În *tabelul 7.27* este prezentată matricea program a experimentului factorial compus 2^4 -stea cu 4 factori de influență.

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, determinându-se conform modelului matematic impus, următoarele:

- coeficienții de regresie pentru polinomul de gradul I (*tabelul 7.28*);
- influența FI și interacțiunile semnificative dintre factori (*figura 7.83*);
- compararea valorilor măsurate cu cele estimate dată tabelar prin precizia de estimație pentru fiecare funcție obiectiv în parte (*tabelul 7.29*);
- suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență (*figurile 7.85 - 7.102*).

Valorile coeficienților de regresie din *tabelul 7.28*, fac ca forma modelului matematic polinomial de ordinul doi, pentru FO - Y_{B1} , Y_{B2} și Y_{B3} să devină:

$$Y_{C1} = 20.4111 - 3.38571A + 7.04082B + 0.925595C - 2.51488D + 0.910714AB - 0.02125AC + 0.03125AD - 0.446429BC + 1.16071BD + 6.25 \cdot 10^{-3}CD + 0.115625A^2 - 9.05612B^2 - 0.019375C^2 - 0.859375D^2 \quad (7.23)$$

Tabelul 7.27. Matricea program a experimentului factorial compus 2^4 -stea analizat

Nr. încercare	Nivel factor de influență					FO		
	x_0	x_{C1}	x_{C2}	x_{C3}	x_{C4}	$Y_{C1} \cdot 10^{-3}$	$Y_{C2} \cdot 10^{-3}$	Y_{C3}
1	1	-1	-1	-1	-1	6.5	0	0.894
2	1	1	-1	-1	-1	6.5	6.5	0.909
3	1	-1	1	-1	-1	2.5	6.5	0.853
4	1	1	1	-1	-1	16.5	2.5	0.615
5	1	-1	-1	1	-1	6.5	0	0.932
6	1	1	-1	1	-1	6.5	19.5	0.805
7	1	-1	1	1	-1	6.5	0	0.784
8	1	1	1	1	-1	11.5	6.5	0.717
9	1	-1	-1	-1	1	0	9.5	0.857
10	1	1	-1	-1	1	4.5	13	0.878
11	1	-1	1	-1	1	6.5	13	0.632
12	1	1	1	-1	1	12.5	9.5	0.668
13	1	-1	-1	1	1	3.5	0	0.812
14	1	1	-1	1	1	6.5	7	0.713
15	1	-1	1	1	1	2.5	2.5	0.714
16	1	1	1	1	1	10.5	2.5	0.685
17	1	-2	0	0	0	14.5	0	0.856
18	1	2	0	0	0	22	6.5	0.736
19	1	0	-2	0	0	0	6.5	0.921
20	1	0	2	0	0	4.5	6.5	0.679
21	1	0	0	-2	0	6.5	4.5	0.893
22	1	0	0	2	0	3	0	0.751
23	1	0	0	0	-2	6.5	14.5	0.818
24	1	0	0	0	2	0	19.5	0.634
25	1	0	0	0	0	6.5	6.5	0.736
26	1	0	0	0	0	6.5	6.5	0.701

Tabelul 7.28. Valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic analizat al celor trei FO

FO – Y_{C1}		FO – Y_{C2}		FO – Y_{C3}	
Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b_0	20.4111	b_0	-16.2143	b_0	1.30156
b_1	-3.38571	b_1	1.70595	b_1	-0.0219845
b_2	7.04082	b_2	26.7857	b_2	-0.483861
b_3	0.925595	b_3	$-4.16667 \cdot 10^{-3}$	b_3	-0.0269381
b_4	-2.51488	b_4	9.54464	b_4	-0.0945357
b_{12}	0.910714	b_{12}	-1.33929	b_{12}	$-3.85714 \cdot 10^{-3}$
b_{13}	-0.02125	b_{13}	0.07625	b_{13}	$-3.9 \cdot 10^{-4}$
b_{14}	0.03125	b_{14}	-0.26875	b_{14}	$4.325 \cdot 10^{-3}$
b_{23}	-0.446429	b_{23}	-0.625	b_{23}	0.0145714
b_{24}	1.16071	b_{24}	1.51786	b_{24}	$1.78571 \cdot 10^{-3}$
b_{34}	$6.25 \cdot 10^{-3}$	b_{34}	-0.54375	b_{34}	$-9.75 \cdot 10^{-4}$
b_{11}	0.115625	b_{11}	-0.0397917	b_{11}	$7.425 \cdot 10^{-4}$
b_{22}	-9.05612	b_{22}	-1.4881	b_{22}	0.156633
b_{33}	-0.019375	b_{33}	-0.0497917	b_{33}	$9.875 \cdot 10^{-4}$
b_{44}	-0.859375	b_{44}	2.44271	b_{44}	$6.875 \cdot 10^{-4}$

$$Y_{C2} = -16.2143 + 1.70595A + 26.7857B - 4.16667 \cdot 10^{-3}C + 9.54464D - 1.33929AB + 0.07625AC - 0.26875AD - 0.625BC + 1.51786BD - 0.54375CD - 0.0397917A^2 - 1.4881B^2 - 0.0497917C^2 + 2.44271D^2 \quad (7.24)$$

$$Y_{C3} = 1.30156 - 0.0219845A - 0.483861B - 0.0269381C - 0.0945357D - 3.85714 \cdot 10^{-3}AB - 3.9 \cdot 10^{-4}AC + 4.325 \cdot 10^{-3}AD + 0.0145714BC + 1.78571 \cdot 10^{-3}BD - 9.75 \cdot 10^{-4}CD + 7.425 \cdot 10^{-4}A^2 + 0.156633B^2 + 9.875 \cdot 10^{-4}C^2 + 6.875 \cdot 10^{-4}D^2 \quad (7.25)$$

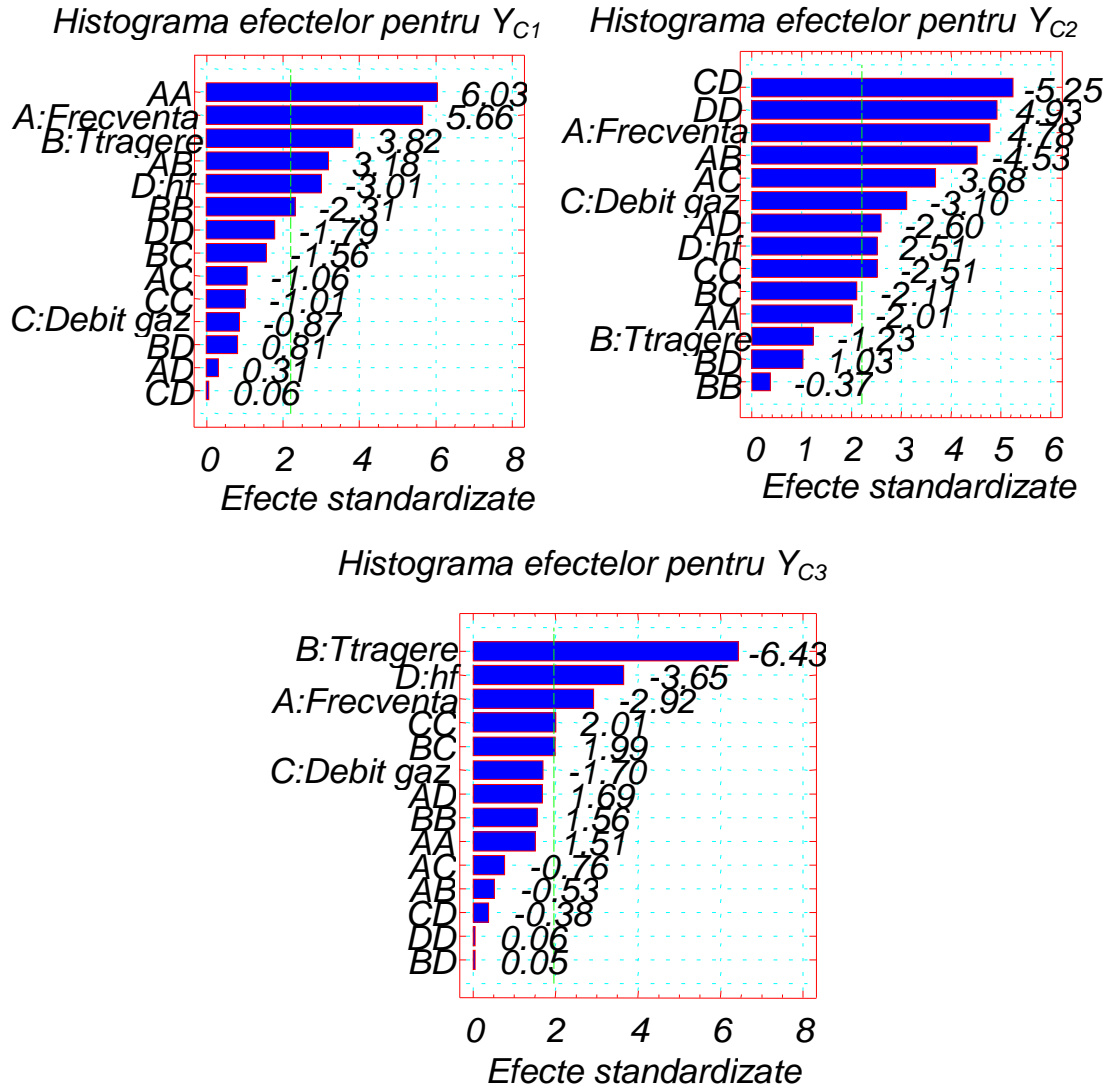


Figura 7.83. Histogramele efectelor variabilelor independente asupra FO

Din cele trei histograme ale efectelor variabilelor independente asupra funcțiilor obiectiv Y_{C1} , Y_{C2} și Y_{C3} , prin eliminarea efectelor ne semnificative ale factorilor de influență, ecuațiile polinomiale ale modelelor matematice devin:

$$Y_{C1} = 20.4111 - 3.38571A + 7.04082B - 2.51488D + 0.910714AB + 0.115625A^2 - 9.05612B^2 \quad (7.26)$$

$$Y_{C2} = -16.2143 + 1.70595A - 4.16667 \cdot 10^{-3}C + 9.54464D - 1.33929AB + 0.07625AC - 0.26875AD - 0.54375CD - 0.0497917C^2 + 2.44271D^2 \quad (7.27)$$

$$Y_{C3} = 1.30156 - 0.0219845A - 0.483861B - 0.0945357D + 0.0145714BC + 9.875 \cdot 10^{-4}C^2 \quad (7.28)$$

Pentru funcția obiectiv Y_{C1} , influențe semnificative au variabilele independente (A) frecvența radiației laser, (B) timpul de acționare al FL, (D) poziția planului focal față de piesă, precum și interacțiunile de ordinul doi dintre frecvența radiației (A) și timpul de acționare al FL (B). O influență semnificativă o au și factorii pătratici ai celor doi factori de influență (A^2 și B^2).

Asupra FO - Y_{C2} , au influențe semnificative atât variabilele independente (A) frecvența radiației laser, (C) debitul gazului de lucru și respectiv (D) poziția planului focal față de piesă, cât și interacțiunile de ordinul doi (AC), (AD), (CD) precum și factorii pătratici (C^2) și (D^2).

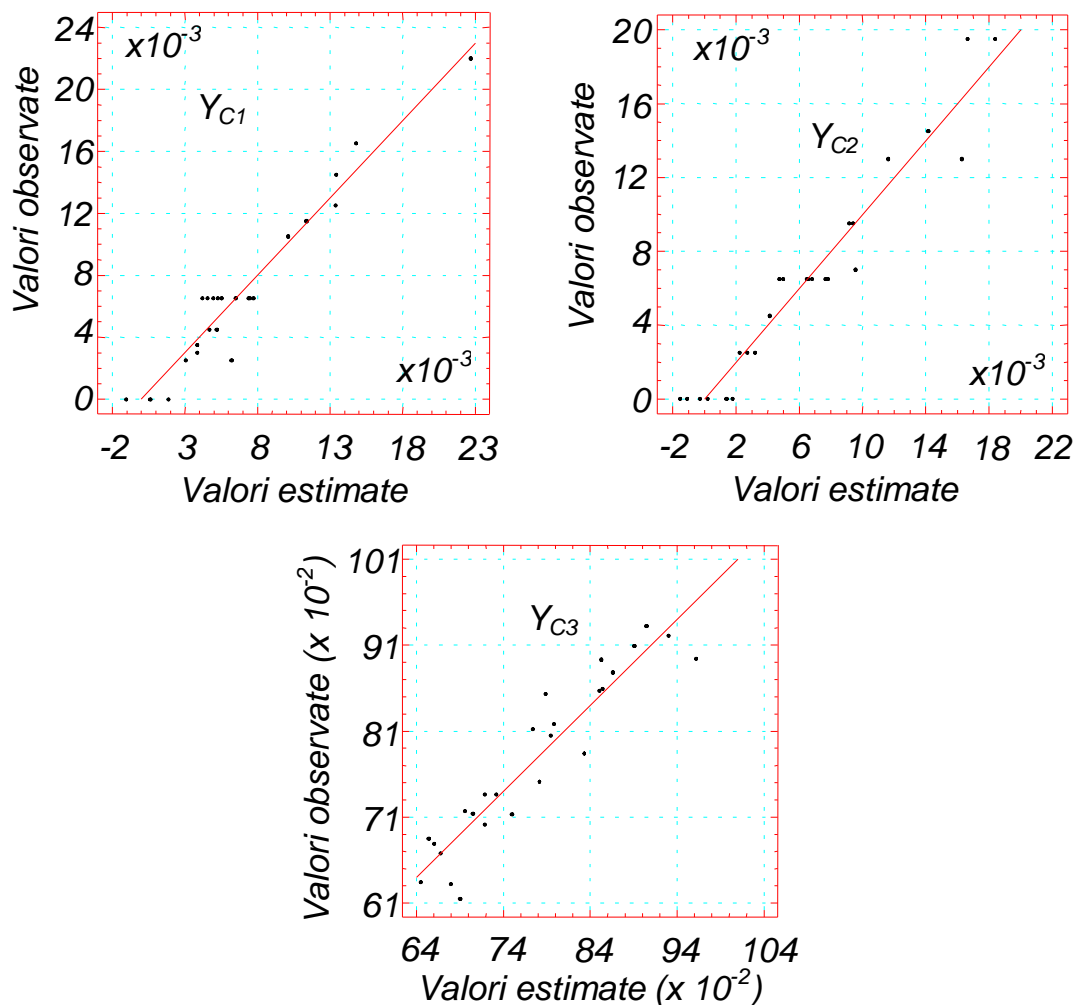


Figura 7.84. Reprezentarea grafică a preciziei de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv

Asupra FO - Y_{C3} , influențe semnificative au variabilele independente (A), (B) și respectiv (D) dar și interacțiunea de ordinul doi (BC) și factorul pătratic (C^2).

Precizia de estimare a modelului matematic pentru fiecare funcție obiectiv în parte este dată în *tabelul 7.29*. Se poate spune că există o concordanță relativ bună între valorile estimate cu ajutorul modelului polinomial adoptat și cele rezultate în urma experimentului, observată și din graficele reprezentate în *figura 7.84*.

Tabelul 7.29. Precizia de estimare a modelului matematic analizat pentru cele trei FO

FO - Y_{C1}	FO - Y_{C2}	FO - Y_{C3}
Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]	Precizia de estimare [%]
93,36	94,17	89,98

În cele ce urmează vor fi prezentate curbele de răspuns ale tuturor combinațiilor dintre factorii de influență pentru a putea analiza influența factorilor asupra celor trei funcții obiectiv alese pentru prelucrarea cu radiație laser a sorturilor de sticlă optică.

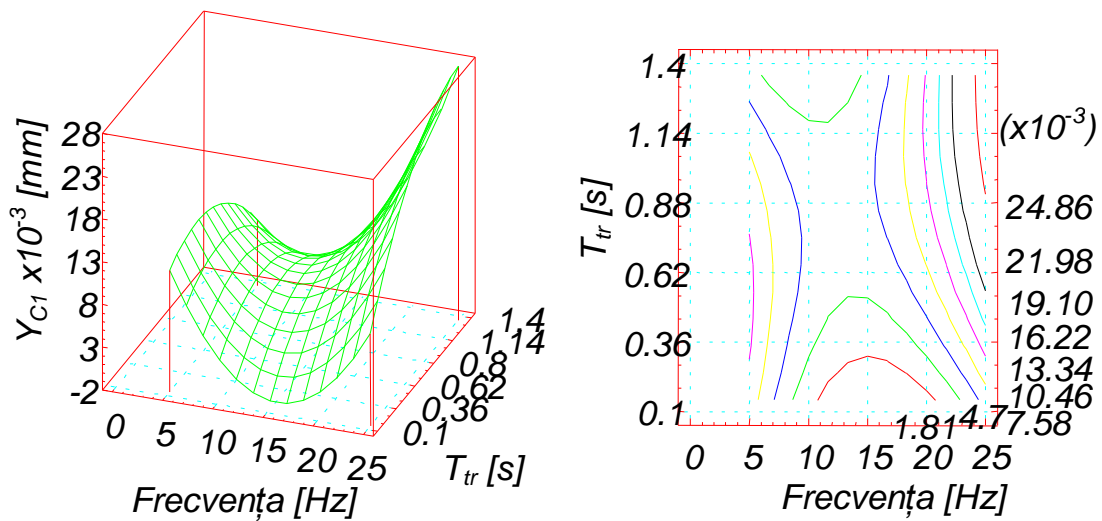


Figura 7.85. Influența frecvenței radiației laser și a timpului de acțiune al fascicului laser asupra funcției obiectiv Y_{C1}

Graficele din *figura 7.85*, arată că abaterea de la circularitate la intrarea fascicului în piesă Y_{C1} , tinde spre valori minime pentru valori medii ale frecvenței radiației laser și a timpului de acțiune al fascicului laser.

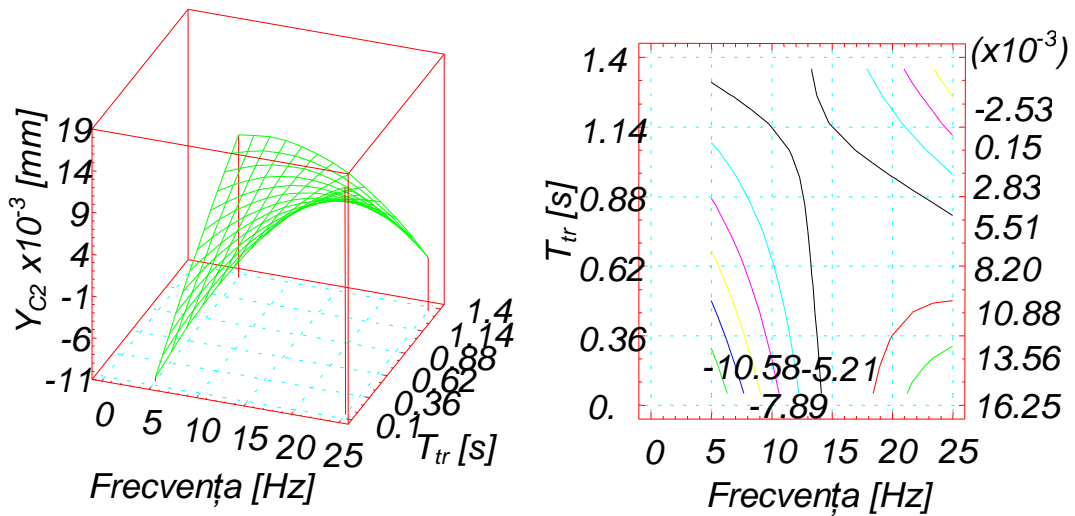


Figura 7.86. Influența frecvenței radiației laser și a timpului de acțiune al fascicului laser asupra funcției obiectiv Y_{C2}

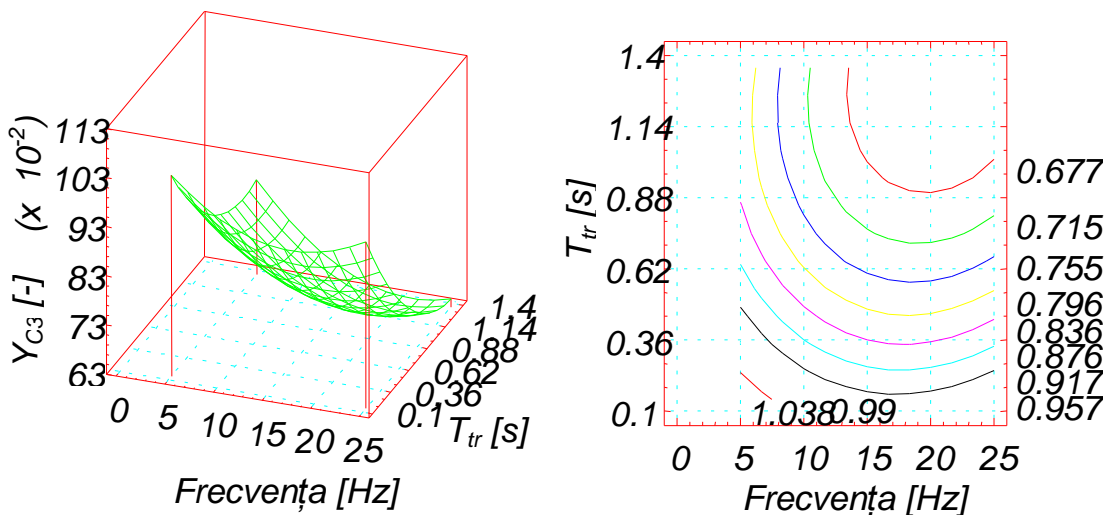


Figura 7.87. Influența frecvenței radiației laser și a timpului de acțiune al fascicului laser asupra funcției obiectiv Y_{C3}

Pentru abaterea de la circularitate la ieșirea fascicului din piesă Y_{C2} , se observă (figura 7.86) că pentru valori mari ale frecvenței radiației laser și a timpului de acțiune al fascicului laser, obținem valori minime ale funcției obiectiv analizate. În cazul abaterii de la cilindricitate Y_{C3} , valori optime ale acestei funcții obiectiv pentru prelucrarea prin găurire cu radiație laser a sortului de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $0,02 \mu\text{m}$, se obțin atunci când atât frecvența radiației laser cât și timpul de acțiune al fascicului laser tind spre valori maxime (figura 7.87).

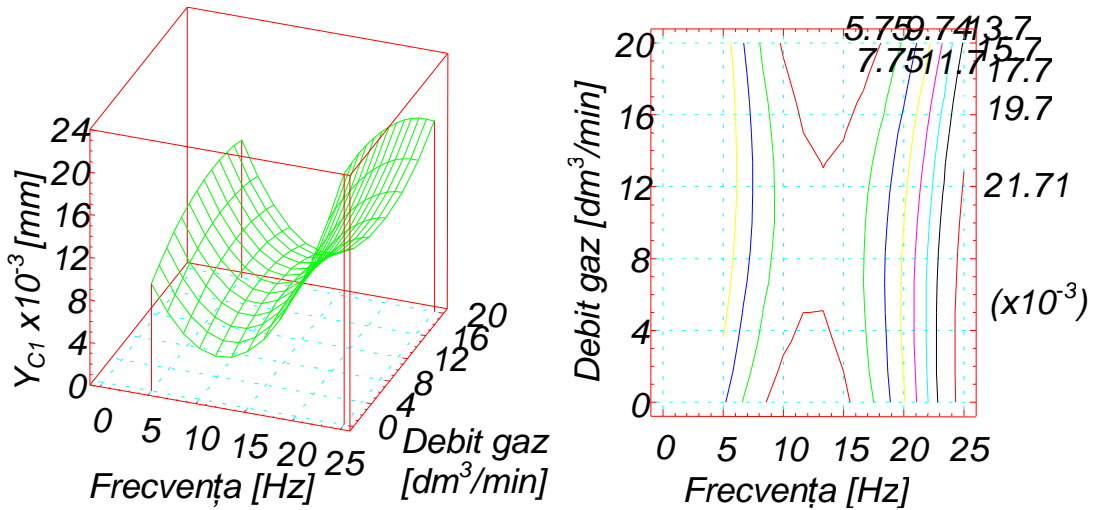


Figura 7.88. Influența frecvenței radiației laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C1}

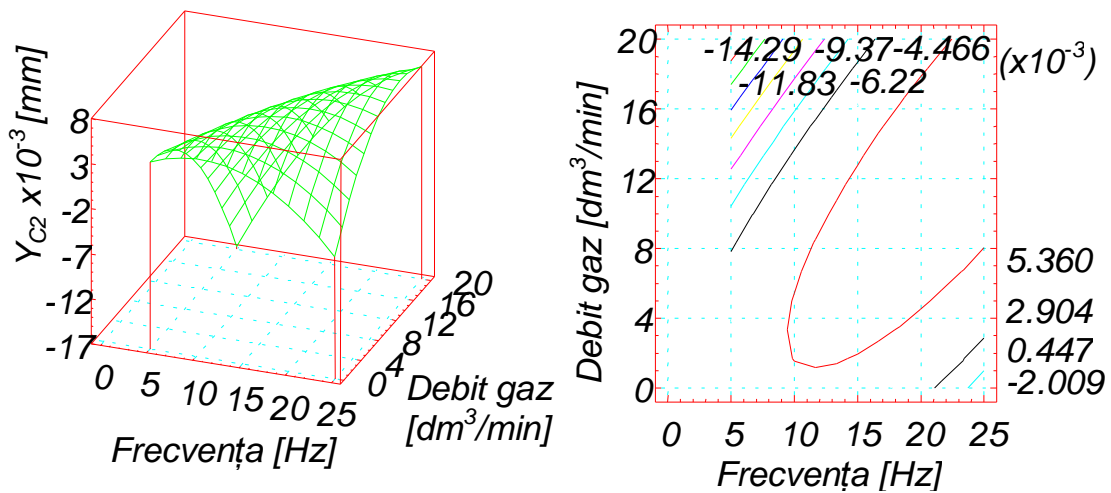


Figura 7.89. Influența frecvenței radiației laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C2}

În această situație funcția obiectiv Y_{C1} tinde spre valori minime atunci când debitul gazului de lucru și respectiv frecvența radiației laser au valori medii *figura 7.88*. Referitor la influența celor doi factori asupra abaterii de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă se observă că valori optime pentru aceasta se obțin la frecvențe mari ale radiației și respectiv debit mare al gazului de lucru (*figura 7.89*).

Din graficele prezentate în *figura 7.90*, se poate vedea că la valori mari ale frecvenței și valori medii ale debitului de gaz (aer comprimat), funcția obiectiv – Y_{C3} (abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă) are valori minime.

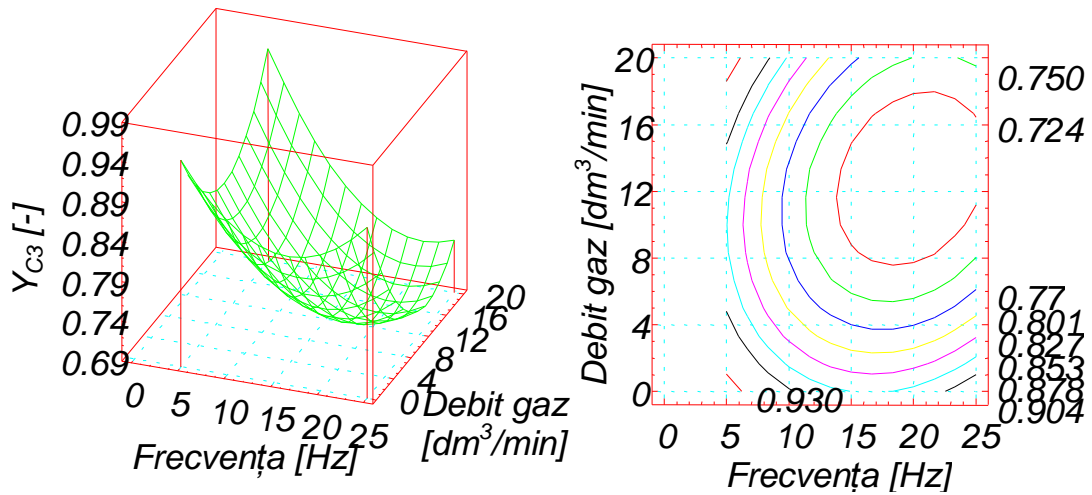


Figura 7.90. Influența frecvenței radiației laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C3}

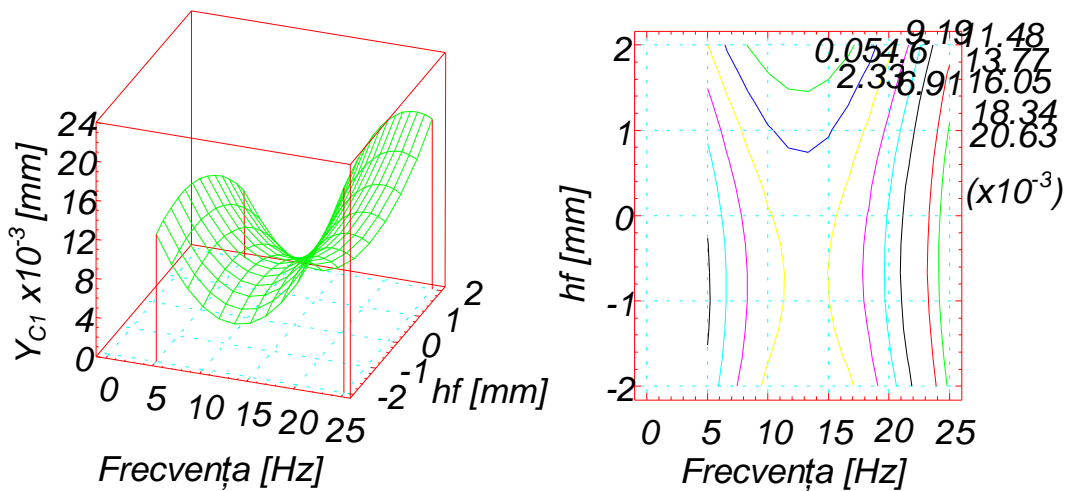


Figura 7.91. Influența frecvenței radiației laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C1}

Așa cum se poate vedea și în figura 7.91 abaterea de la circularitate la intrarea fascicului în eșantionul de sticlă are valori minime pentru valori medii ale frecvenței radiației laser și respectiv poziții ale planului focal pe suprafața eșantionului pe care acționează fasciculul laser.

Pentru aceeași factori de influență se pot observa valori minime ale funcției obiectiv Y_{C2} atunci când frecvența radiației laser are valori mici iar planul focal e poziționat sub eșantionul de sticlă optică (figura 7.92).

Graficele din figura 7.93 ne arată influența frecvenței radiației laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C3} care, tinde spre valori mai mici când planul focal este situat deasupra piesei iar frecvența radiației laser are valori medii.

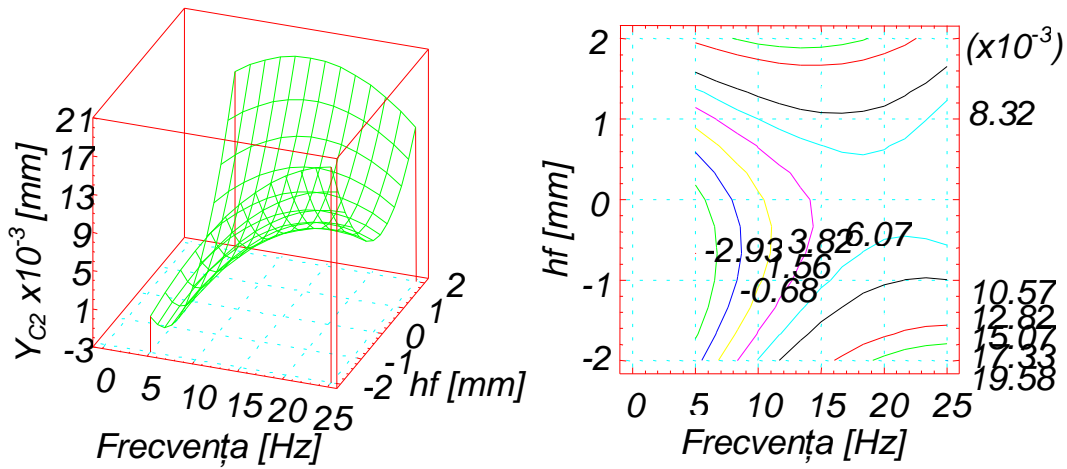


Figura 7.92. Influența frecvenței radiației laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C2}

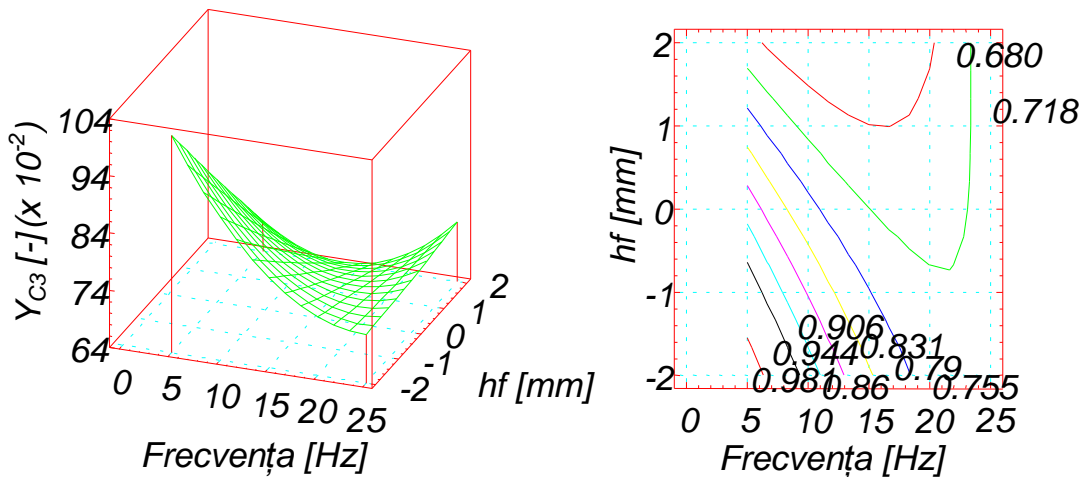


Figura 7.93. Influența frecvenței radiației laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C3}

Pentru abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă Y_{C1} , putem spune conform figurii 7.94 că obținem valori minime ale acesteia pentru valori mici ale celor doi factori de influență – debitul gazului de lucru și timpul de acționare al fasciculului pe piesă.

Abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din sortul de sticlă optică înregistrează valori mici pentru valori mari ale debitului gazului de lucru și ale timpului de acționare al fasciculului pe piesă. (conform figurii 7.95).

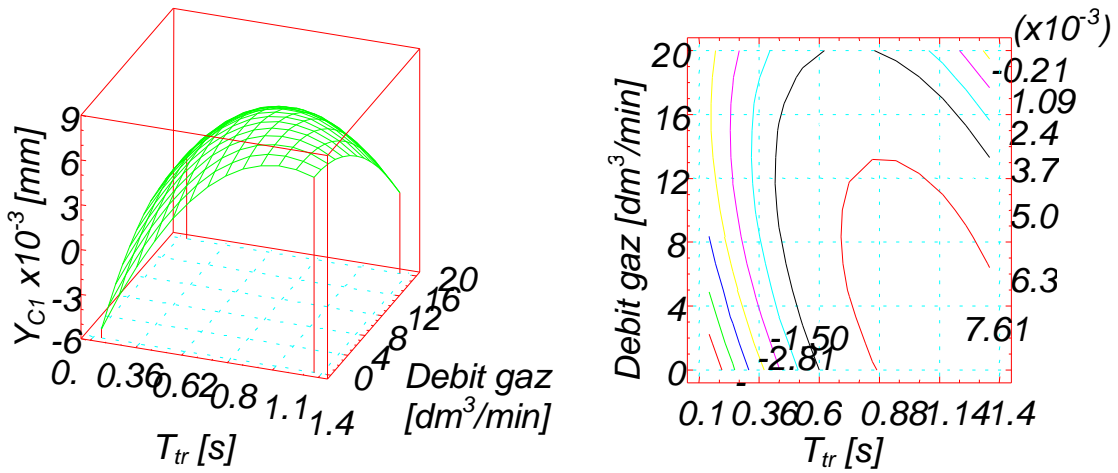


Figura 7.94. Influența timpului de acționare al fascicului laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C1}

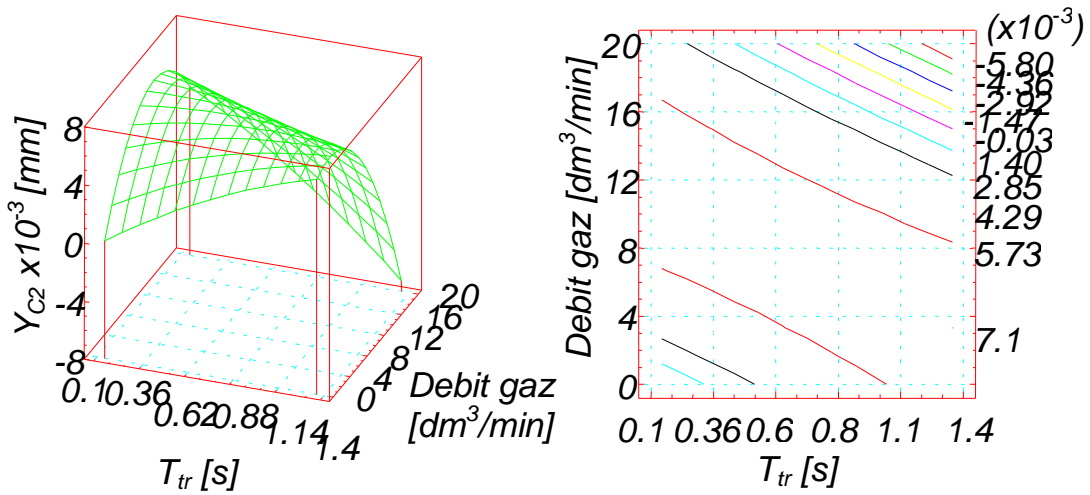


Figura 7.95. Influența timpului de acționare al fascicului laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C2}

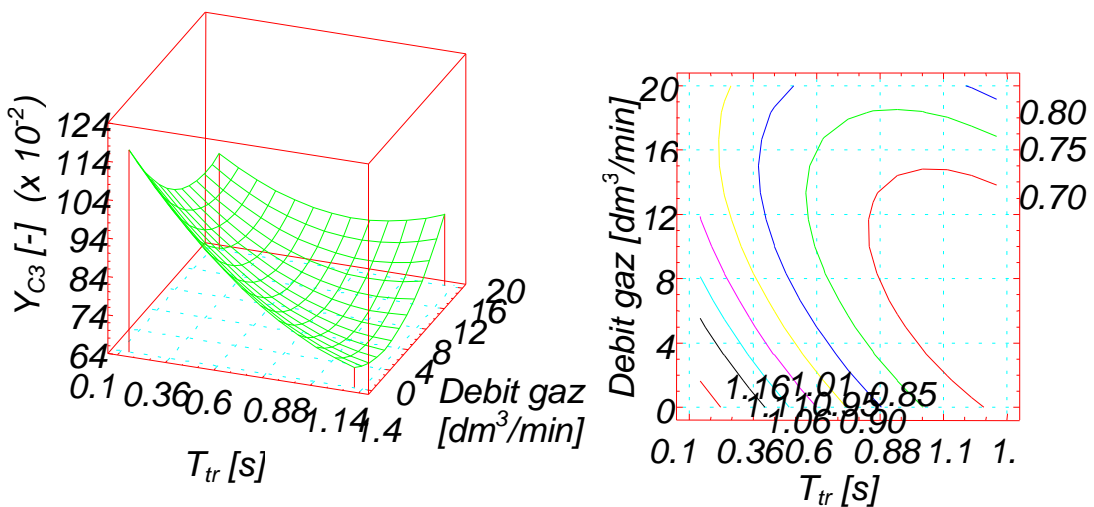


Figura 7.96. Influența timpului de acționare al fascicului laser și a debitului gazului de lucru asupra funcției obiectiv Y_{C3}

Valori minime ale funcției obiectiv Y_{C3} se pot observa atunci când timpului de acționare al fasciculului pe piesă este mare iar debitului gazului de lucru înregistrează valori medii (figura 7.96).

Când timpul de acționare al fasciculului laser pe piesă este mic iar poziția planului focal este deasupra eșantionului ce urmează a fi prelucrat, abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă tinde spre valori mici (figura 7.97). Abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă înregistrează valori minime în cazul în care timpul de acționare al FL este mare iar planul focal este situat la baza eșantionului (figura 7.98).

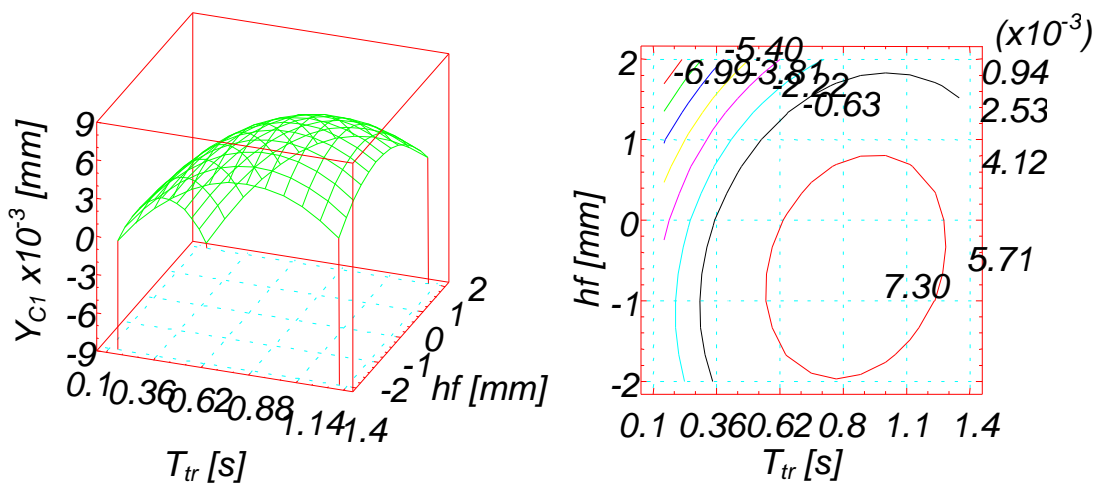


Figura 7.97. Influența timpului de acționare al fasciculului laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C1}

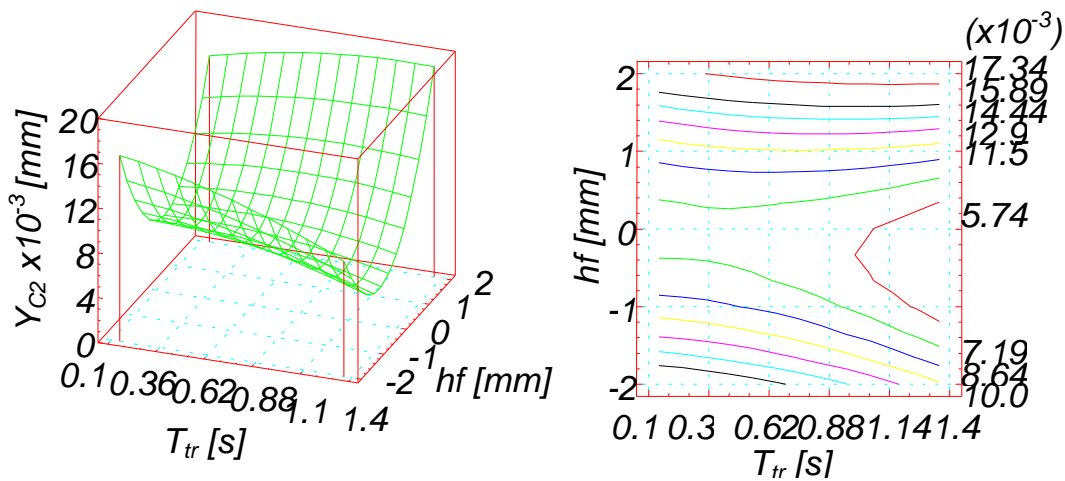


Figura 7.98. Influența timpului de acționare al fasciculului laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C2}

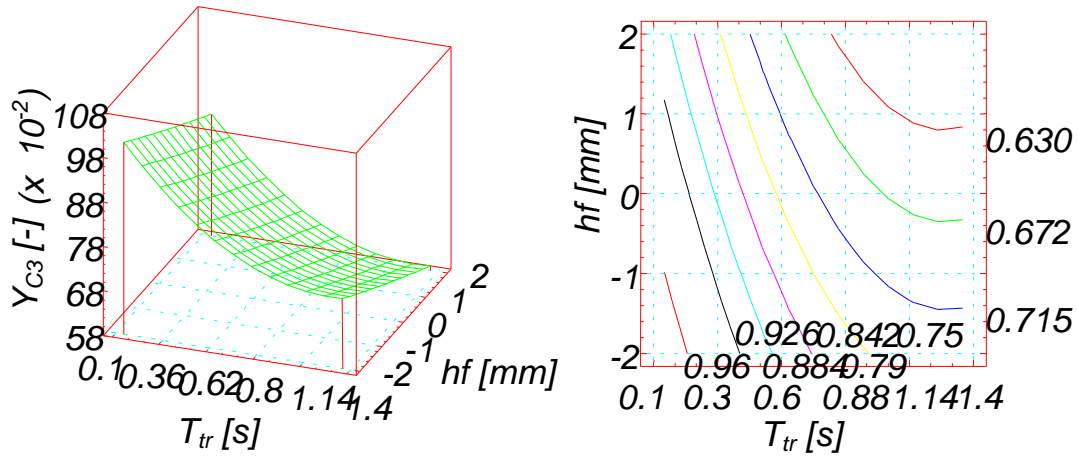


Figura 7.99. Influența timpului de acționare al fascicului laser și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C3}

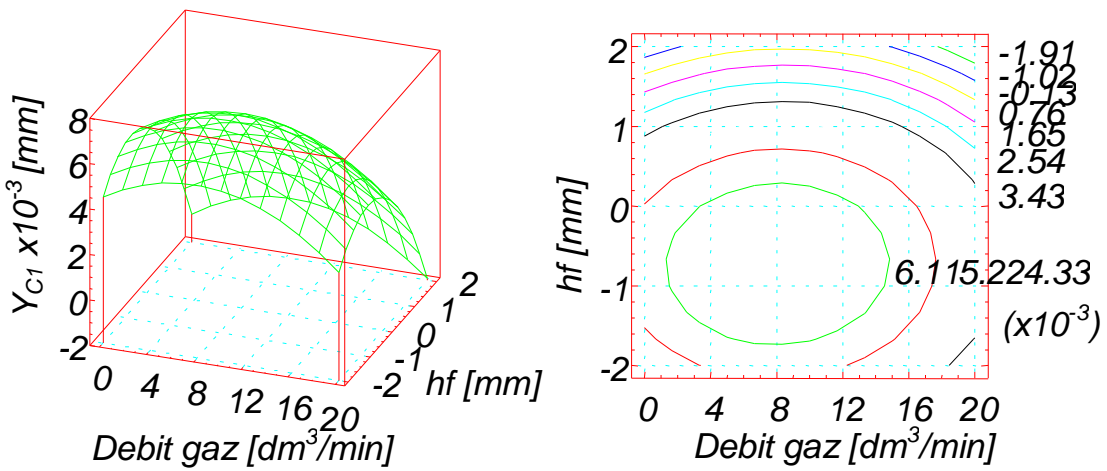


Figura 7.100. Influența debitului gazului de lucru și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C1}

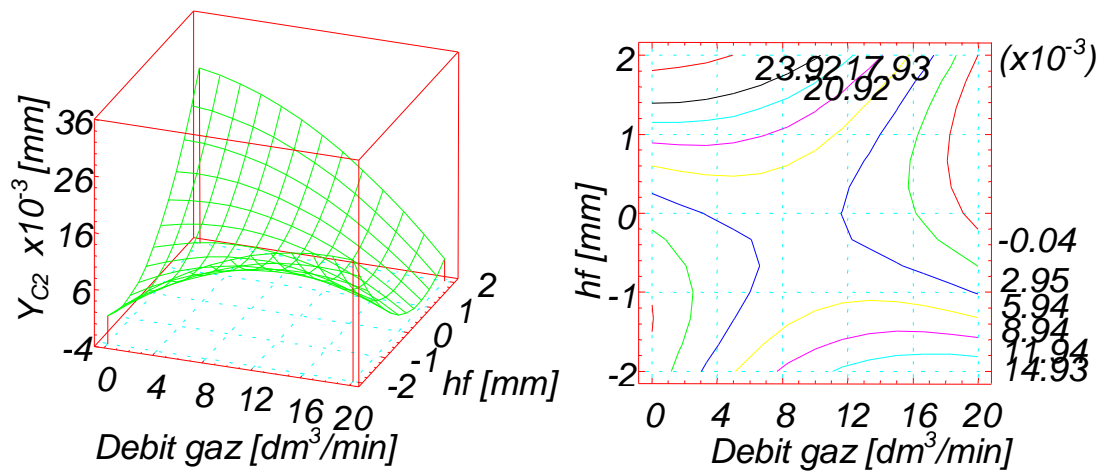


Figura 7.101. Influența debitului gazului de lucru și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C2}

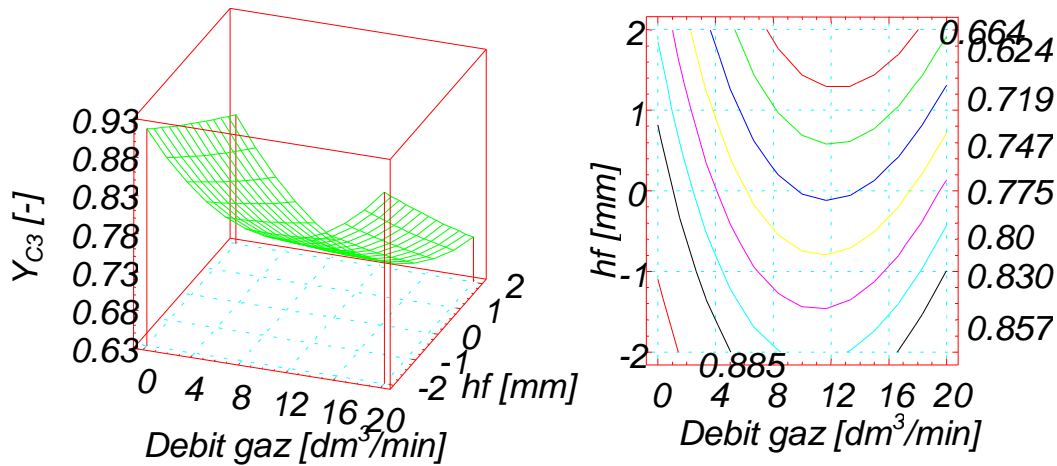


Figura 7.102. Influența debitului gazului de lucru și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_{C3}

În figura 7.99, se disting valori mici ale FO – Y_{C3} pentru valori mari ale timpului de acționare al FL pe piesă și poziționarea planului focal deasupra eșantionului ce trebuie prelucrat.

Pentru un debit mare al gazului de lucru precum și poziționarea planului focal deasupra sortului de sticlă prelucrat, se observă conform figurii 7.100 că valoarea funcției obiectiv Y_{C1} tinde spre valori minime.

Deasemenea valori optime pentru abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului laser din sortul de sticlă se înregistrează la valori medii ale debitului de gaz când planul focal este poziționat la baza eșantionului de sticlă (figura 7.101).

În ceea ce privește influența celor doi factori asupra funcției obiectiv Y_{C3} (figura 7.102), se poate vedea din grafice că valorile minime ale FO se obțin pentru valori medii ale debitului de gaz și poziționarea planului focal deasupra sortului de sticlă prelucrat.

Concluzii

Prelucrările efectuate pe sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ (transparent), cu ajutorul instalației laser cu CO_2 TER, au arătat că pentru fiecare funcție obiectiv analizată factorii de influență au avut tendințe diferite astfel încât să asigure valoarea optimă a acesteia. În condițiile de lucru mai sus menționate influența FI asupra celor trei FO poate fi sistematizată după cum urmează:

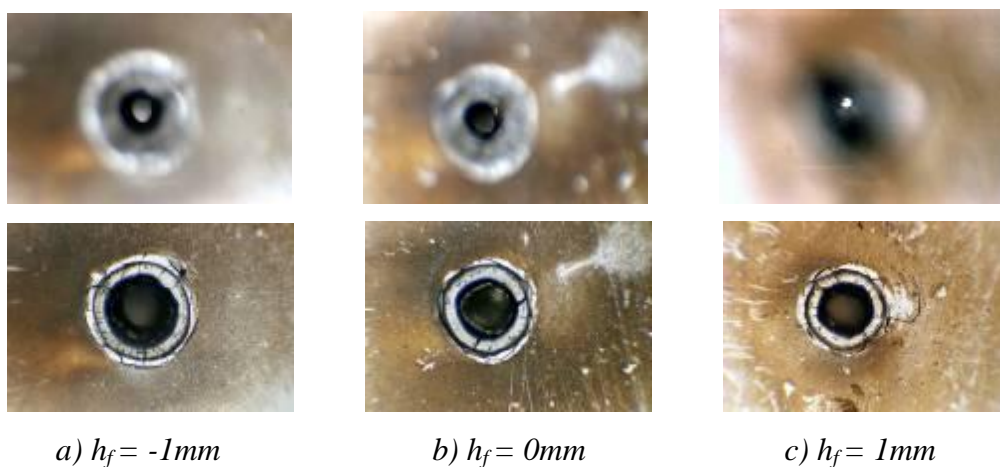
- abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă Y_{C1} , are valori optime pentru timpi de acționare ai FL relativ mici respectiv frecvențe medii ale radiației laser, atunci când planul focal este situat deasupra eșantionului

de sticlă și materialul topit este îndepărtat din zona prelucrată cu ajutorul aerului comprimat la debite medii.

- în ceea ce privește abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului în piesă Y_{C2} , se observă valori minime ale acestei funcții obiectiv pentru timpi de acționare ai FL mari precum și frecvențe mai mari iar debitul gazului de lucru trebuie să fie mai mare decât în cazul abaterii de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă. Planul focal însă, trebuie să fie situat în piesă, mai aproape de baza de fixare a eșantionului pe masa de prelucrare.
- abaterea de la cilindricitate a orificiului prelucrat în piesă – Y_{C3} , are valori optime atunci când atât timpul de acționare cât și frecvența radiației laser au valori mari și debitul gazului de lucru tinde spre valori medii iar planul de focalizare al fasciculului laser este poziționat deasupra eșantionului de sticlă.

7.3.3.1. Analiza efectelor induse de radiația laser în sortul de sticlă optică BK7 în cazul prelucrării prin găurire cu radiație laser efectuată pe instalația laser cu CO₂ TER din Franța

Deoarece s-a aplicat același tip de prelucrare cu laser (și anume operația de găurire) dar pe o altă instalație laser cu parametri de intrare diferiți de cei studiați anterior, s-a efectuat și în această situație o analiză calitativă asupra aspectului prelucrării în zona influențată termic (ZIT) și a dimensiunii acesteia pentru sortul de sticlă optică BK7. Interacțiunea dintre radiația laser și sortul de sticlă optică prelucrat prin operația de găurire va fi exemplificată pe baza imaginilor obținute de la un aparat de fotografiat cu factor de marire de 27x.



a) $h_f = -1mm$

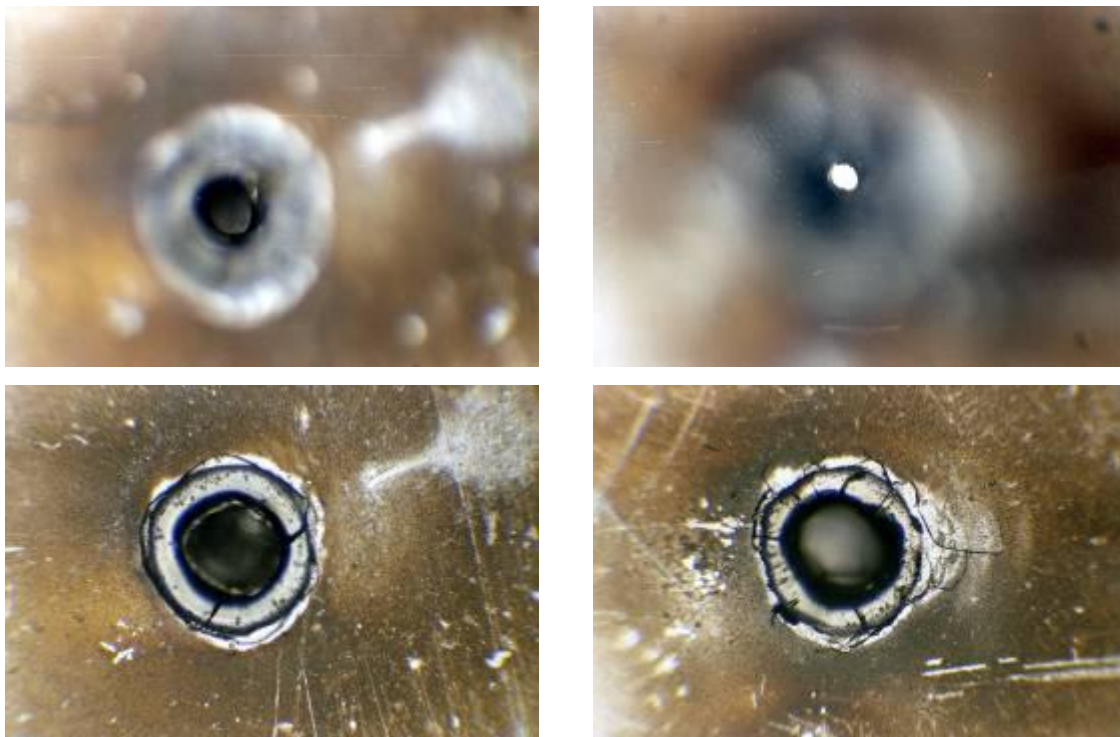
b) $h_f = 0mm$

c) $h_f = 1mm$

Figura 7.103. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu m$ pe instalația laser cu CO₂ TER

În cele ce urmează se va pune accent pe aspectul și dimensiunea alezajelor prelucrate cu radiație laser în sortul de sticlă optică BK7 și respectiv a zonei influențate termic și mai puțin pe influența factorilor asupra celor trei funcții obiectiv despre care s-a discutat în *subcapitolul 7.3.3*.

Astfel, se poate observa în *figura 7.103* că atunci când poziția planului focal se modifică, toți ceilalți factori care intervin în proces rămânând constanți ($F = 20$ Hz, $T_{tr} = 0,4$ s, $I = 10$ A, debit gaz $Q_{gaz} = 10$ dm³/min), diametrul alezajului crește atât la intrarea fasciculului în piesă cât și la ieșirea acestuia din eșantionul prelucrat dacă focalizarea se realizează sub obiectul de prelucrat. Având în vedere dimensiunile foarte mici ale alezajelor obținute în urma prelucrării cu radiație laser de tip CO₂ TER se poate spune că în toate cele trei situații ale poziționării planului focal, zona influențată termic este foarte mică, dispusă radial și uniform, cu o carbonizare vizibilă spre orificiul prelucrat și respectiv o modificare a indicelui de refracție imediat în zona adiacentă carbonizării. La ieșirea fasciculului din eșantionul prelucrat zona carbonizată își reduce dimensiunea pe raza alezajului obținut și dispare atunci când focalizarea se face în piesă sau deasupra acesteia (*figurile 7.106 și 7.107*).

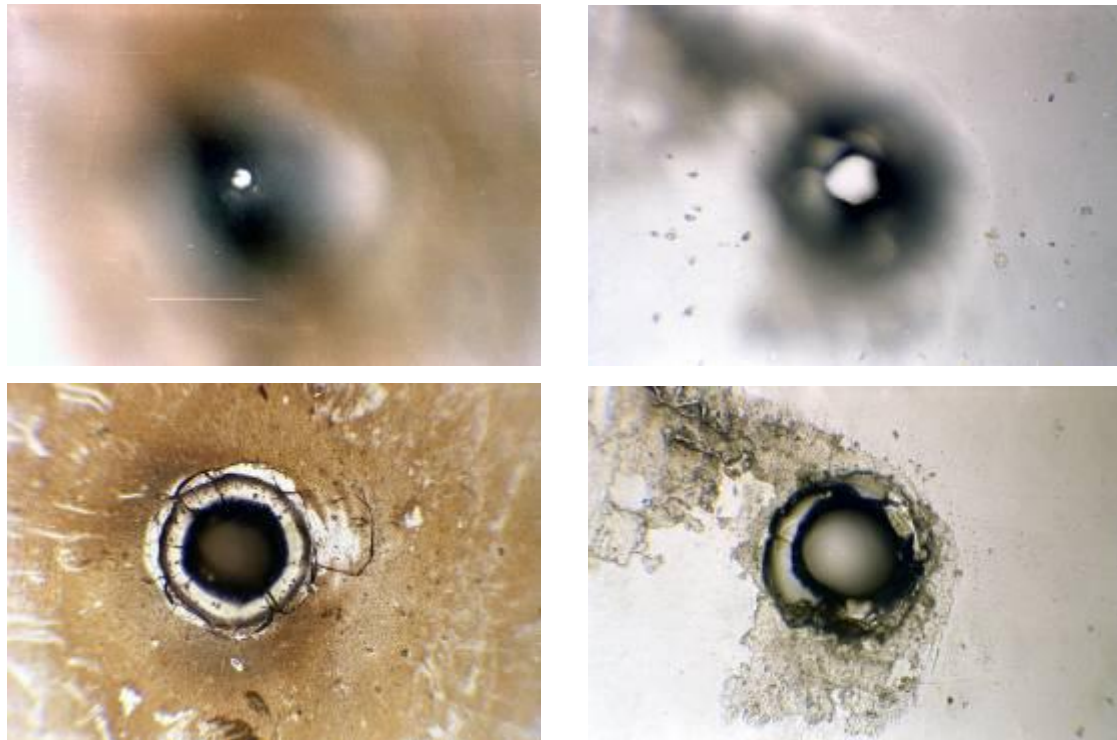


a) $T_{tr} = 0,4$ s

b) $T_{tr} = 0,7$ s

Figura 7.104. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02$ μ m pentru $F = 20$ Hz, $Q_{gaz} = 10$ dm³/min, $h_f = 0$ mm

La intrarea fasciculului în sortul supus prelucrării cu radiație laser (*figura 7.104*), se poate remarca o mărire a zonei carbonizate odată cu creșterea timpului de acționare al radiației laser, zona influențată termic prezentând în această situație un aspect mai neuniform, cu fisuri dispuse radial.



a) $T_{tr} = 0,4 s$

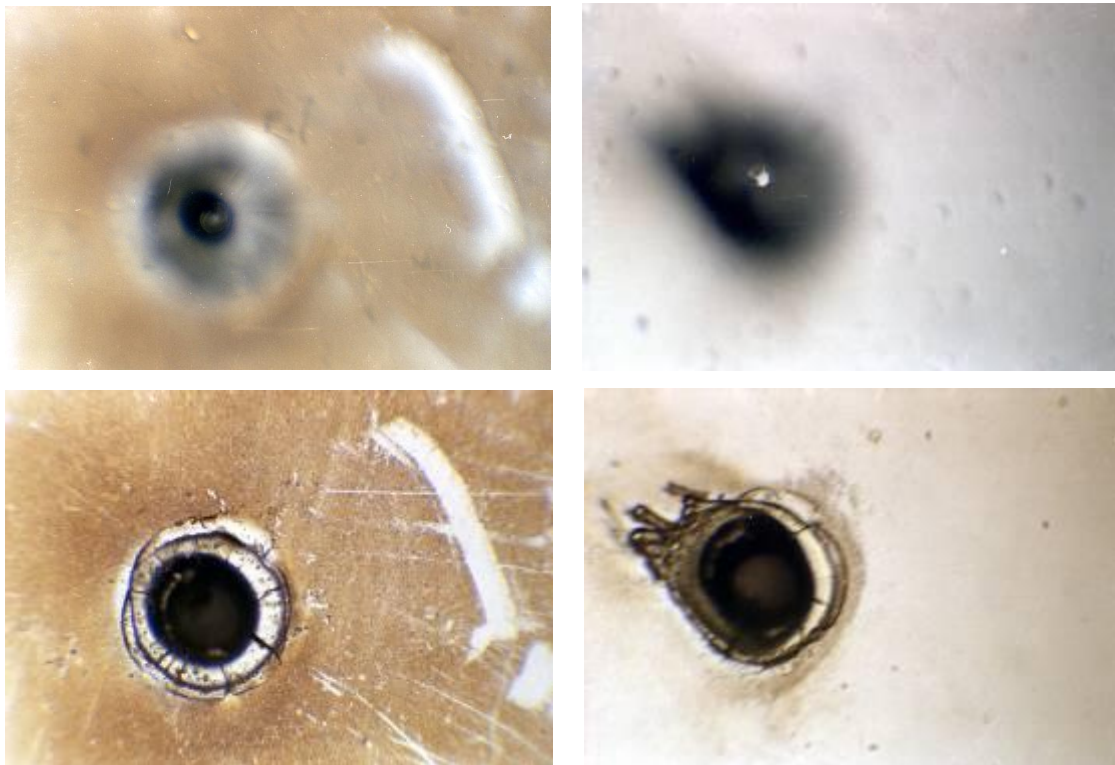
b) $T_{tr} = 1 s$

Figura 7.105. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu m$ pentru $F = 20 Hz$, $Q_{gaz} = 10 dm^3/min$, $h_f = 1mm$

Același lucru cu privire la ZIT se poate observa și în *figura 7.105*, subliniind faptul că odată cu creșterea timpului de acționare al fasciculului laser asupra eșantionului de prelucrat dimensiunea alezajelor crește atât la intrarea fasciculului în piesă cât și la ieșirea acestuia.

Când debitul gazului de lucru crește, dimensiunile ajezalului obținut în urma prelucrării cresc la intrarea respectiv ieșirea fasciculului din piesă, ZIT scade, dar datorită presiunii ridicate a aerului comprimat adus în zona de lucru, materialul topit tinde să adere la suprafața obiectului prelucrat (*figura 7.106*).

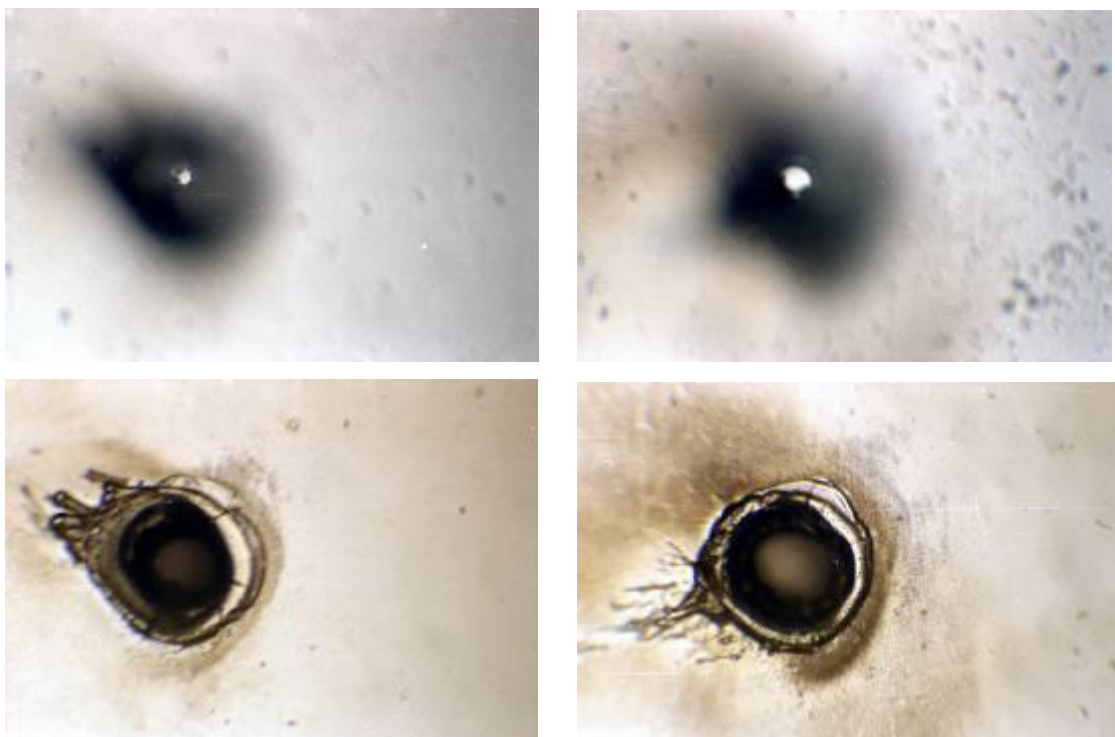
Dacă se modifică doar frecvența de repetiție a impulsurilor radiației laser așa cum se poate observa și în *figura 7.107*, dimensiunile alezajelor la intrarea respectiv ieșirea fasciculului din piesă cresc cu creșterea frecvenței iar zona influențată termic scade.



a) $Q_{gaz} = 10 \text{ dm}^3/\text{min}$

b) $Q_{gaz} = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$

Figura 7.106. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ pentru $F = 10 \text{ Hz}$, $T_{tr} = 0,4 \text{ s}$, $h_f = 1 \text{ mm}$



a) $F = 10 \text{ Hz}$

b) $F = 20 \text{ Hz}$

Figura 7.107. Efectele induse de radiația laser în sortul de sticlă BK7 de 1 mm grosime și rugozitate $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ pentru $T_{tr} = 0,4 \text{ s}$, $Q_{gaz} = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$, $h_f = 1 \text{ mm}$

Concluzii

Analizând rezultatele celor două cercetări experimentale realizate pe instalațiile laser cu CO₂ cu parametri diferiți de intrare, dar pe care a fost prelucrat același sort de sticlă optică (BK7) și au fost analizate aceleași funcții obiectiv cantitative și calitative putem scoate în evidență următoarele:

- alezaje de diametre mai mici atât la intrarea fascicului în piesă cât și la ieșirea acestuia pentru prelucrările efectuate pe instalația cu CO₂ TER;
- zona influențată termic mai mică pentru prelucrările cu instalația laser CO₂ TER, datorate și dimensiunilor mici ale acestor alezaje;
- o calitate mai bună în ZIT a alezajelor prelucrate pe instalația laser CO₂ GT-1200 și o abatere de la cilindricitate mult mai mică decât la prelucrările efectuate pe cealaltă instalație.

7.3.4. Cercetările experimentale efectuate pe instalația laser cu Nd-YAG din Franța

Instalația laser Nd-YAG tip SLM40D de proveniență germană fiind o instalație laser de marcaj, s-au prelucrat doar materiale polimerice transparente [7] de tip PC (policarbonat) și respectiv PMMA (polimetacrilat de metil), radiația de lungime de undă $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ fiind insuficientă pentru prelucrarea sorturilor de sticlă optică.

Cele două materiale au fost tratate separat datorită interacțiunii diferite dintre radiația laser și polimer.

7.3.4.1. Cercetările experimentale pentru PMMA

Așa cum s-a văzut în *figura 7.15*, pe eșantionul de PMMA, fascicului laser a fost focalizat la 25 mm în interiorul piesei (adică la jumătate din înălțimea cubului de PMMA – 50x50x50 mm³).

Alți parametri de intrare luați în considerare la prelucrarea prin marcare cu laser a PMMA-ului au fost:

- diafragma de 4 mm
- prelucrare punctiformă pe diametru 225 μm
- intensitatea curentului pentru flash $I = 48 \text{ A}$, constantă
- piesa a fost deplasată manual pe direcțiile x , y (*figura 7.18 b*) pentru asigurarea acțiunii normale a fascicului laser pe suprafața materialului

- sistem de focalizare laser pe direcția z
- distanța focală a lentilei 200 mm
- distribuția energiei laser – multimod
- durata pulsului laser la jumătatea amplitudinii ≈ 300 ns
- caracteristicile materialului (vezi tabelul 7.5)

Datorită spotului laser punctual de diametru 225 μm , în PMMA se formează pe direcția de impact a radiației laser – material, o linie de defecte de diferite mărimi și orientări (numite în continuare plane de clivaj – figura 7.15).

În aceste condiții, conform tabelului 7.7. pentru factorii de influență semnificativi s-au stabilit următoarele valori:

Tabelul 7.30. Factorii de influență pentru prelucrarea prin marcarea cu radiație laser Nd-YAG a PMMA

FI	D ₁ [Hz]	D ₂ [W]	D ₃ [imp/pct.]	D ₄ [-]	FO	h [mm]
	D ₁₁ = 5000 D ₁₂ = 5500 D ₁₃ = 6000 D ₁₄ = 10000 D ₁₅ = 20000 D ₁₆ = 30000	D ₂₁ = 38 D ₂₂ = 39,5 D ₂₃ = 40,5 D ₂₄ = 45,5 D ₂₅ = 48,5 D ₂₆ = 52,5	D ₃₁ = 100 D ₃₂ = 150 D ₃₃ = 200	D ₄₁ = 1 D ₄₂ = 2		Y _{D1}

- D₁ – frecvența F,
- D₂ – puterea P,
- D₃ – număr de impulsuri pe punct,
- D₄ – număr de acționări fascicul laser.
- Y_{D1} – înălțimea liniei de defecte din PMMA – funcție obiectiv.

Valorile P funcție de F pentru I = 48 A și diafragmă de 4 mm

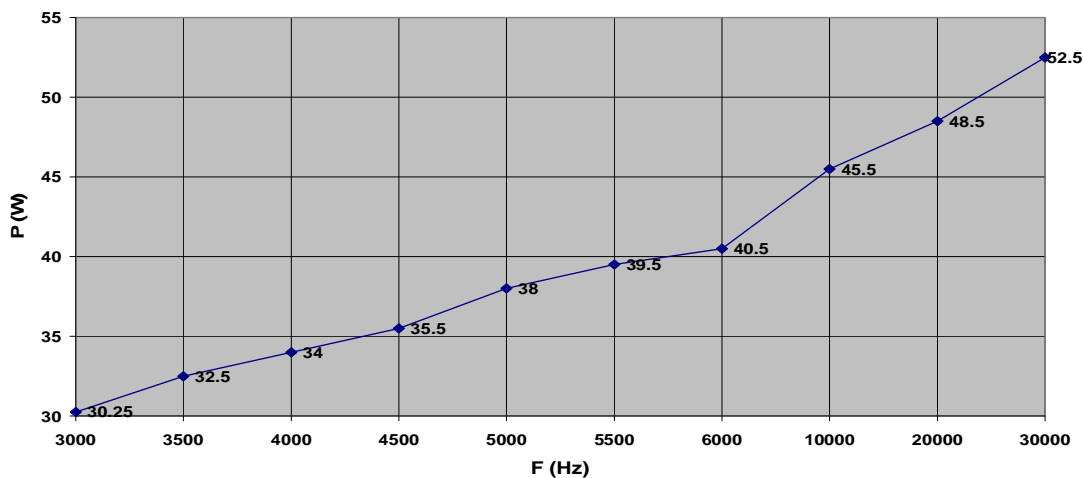


Figura 7.108. Variația puterii în funcție de frecvență pentru intensitate constantă I=48A

În urma cercetărilor efectuate s-a hotărât ca fasciculul laser să acționeze în același loc o dată sau de două ori (D_4), pentru a vedea dacă există diferențe în funcție de cantitatea de radiație absorbită de PMMA. Pentru fiecare serie de măsurători numărul de impulsuri pe punct s-a menținut constant. De asemenea, intensitatea a fost menținută constantă la valoarea 48 A, modificându-se doar frecvența. Pentru fiecare valoare a frecvenței a fost măsurată o valoare a puterii, creșterea frecvenței ducând la creșterea puterii (după cum se poate observa în figura 7.108.).

Rezultatele experimentale sunt prezentate în *tabelele 7.31, 7.32, 7.33.*

Tabelul 7.31. Rezultatele experimentale la prelucrarea cu laser a PMMA pentru $I=48$ A și $D_3=100$ imp./punct

F [Hz]	P [W]	1 acționare	2 acționări
		h [mm]	h [mm]
5000	38	17	28
5500	39,5	16	19
6000	40,5	15	17
10000	45,5	14	20
20000	48,5	7	6
30000	52,5	1	3

Tabelul 7.32. Rezultatele experimentale la prelucrarea cu laser a PMMA pentru $I=48$ A și $D_3=150$ imp./punct

F [Hz]	P [W]	1 acționare	2 acționări
		h [mm]	h [mm]
5000	38	21	28
5500	39,5	20	15
6000	40,5	18	20
10000	45,5	27	17
20000	48,5	3	9
30000	52,5	7	3

Tabelul 7.33. Rezultatele experimentale la prelucrarea cu laser a PMMA pentru $I=48$ A și $D_3=200$ imp./punct

F [Hz]	P [W]	1 acționare	2 acționări
		h [mm]	h [mm]
5000	38	26	25
5500	39,5	23	23
6000	40,5	18	20
10000	45,5	16	14
20000	48,5	12	4

Având în vedere că funcția obiectiv aleasă pentru aceste prelucrări a fost înălțimea liniei de defecte formate în PMMA în urma interacțiunii radiație laser –

material, o prezentare mai elocventă a rezultatelor experimentale de mai sus o reprezintă următoarele grafice:

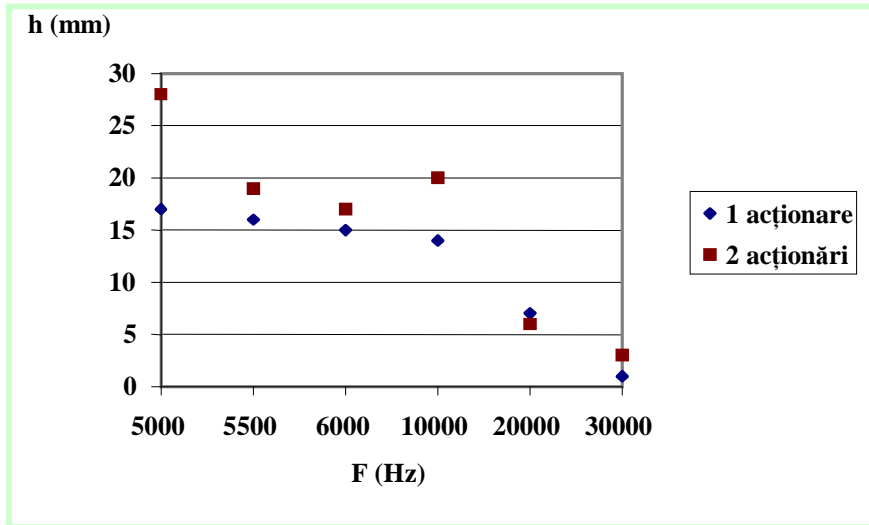


Figura 7.109. Înălțimea liniei de defecte formate în PMMA în funcție de frecvență, pentru $I=48$ A și $Nr. puls=100$ imp/punct

După cum se vede, din fiecare grafic, se poate trage o concluzie clară și anume aceea că pe măsură ce frecvența crește, înălțimea liniei de defecte din PMMA scade. Numărul de acționări în zona prelucrării duce la creșterea înălțimii liniei de defecte. Cu toate acestea, numărul de impulsuri pe punct are o influență mai importantă pentru o singură acționare, observându-se o creștere a înălțimii liniei de defecte odată cu creșterea numărului de impulsuri pe punct. La două acționări în același punct, această creștere a înălțimii liniei de defecte nu mai este semnificativă și nici constantă.

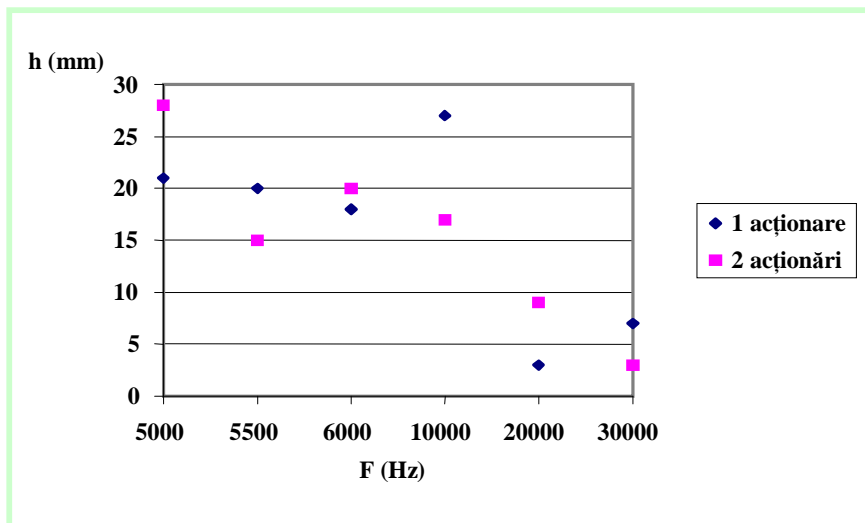


Figura 7.110. Înălțimea liniei de defecte formate în PMMA în funcție de frecvență, pentru $I=48$ A și $Nr. puls=150$ imp/punct

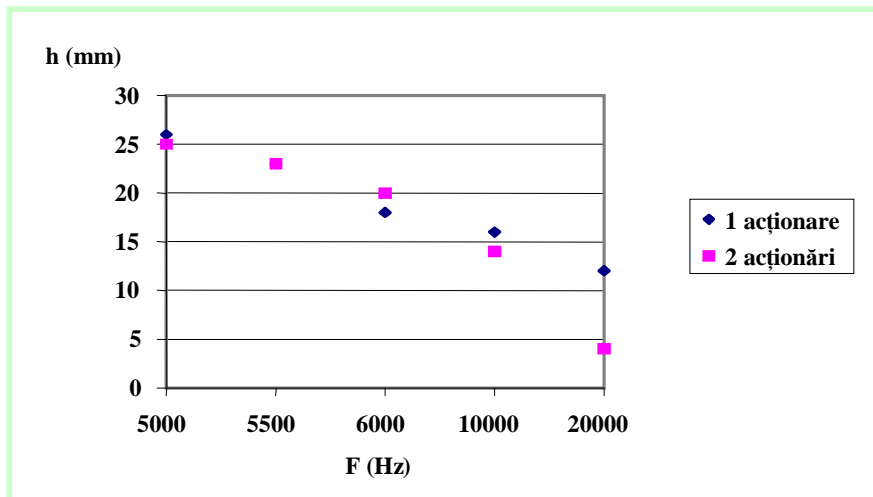


Figura 7.111. Înălțimea liniei de defecte formate în PMMA în funcție de frecvență, pentru $I=48$ A și $Nr. puls=200$ imp/punct

Din analiza de mai sus rezultă că starea amorfă a acestui polimer precum și compoziția chimică a acestuia joacă un rol important în procesul de prelucrare cu laser al PMMA – ului.

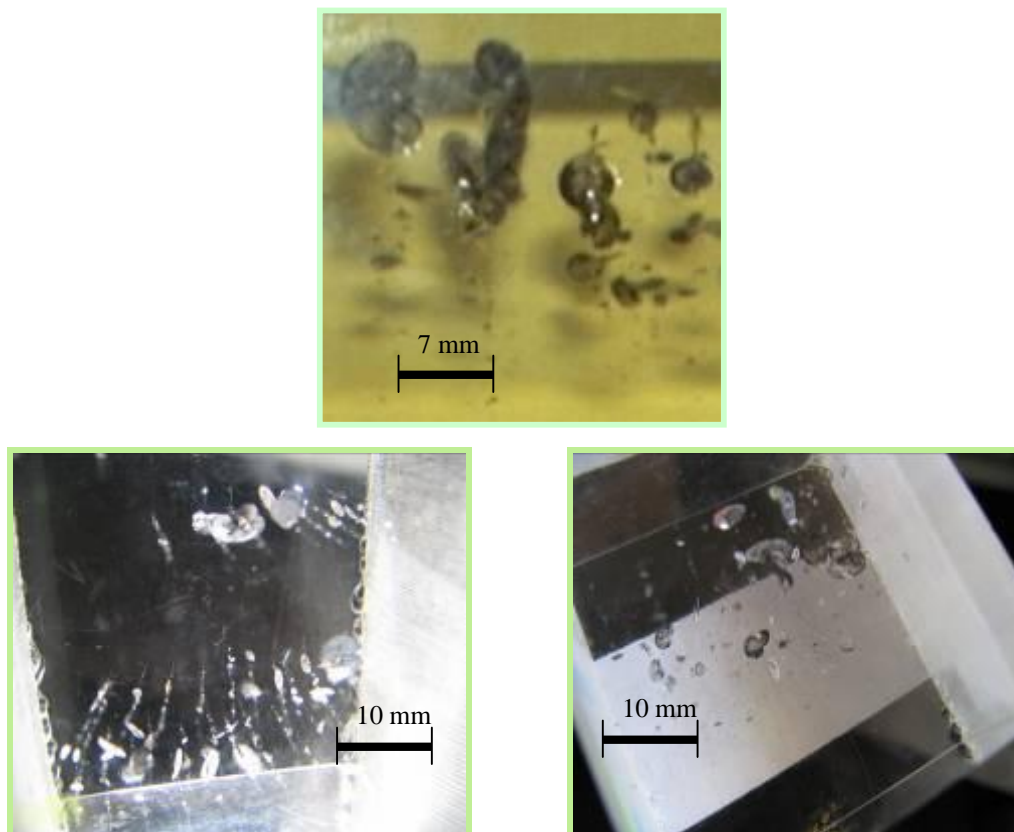


Figura 7.112. Defectele formate în interiorul eșantionului de PMMA

Astfel putem obține pentru o frecvență de 30 kHz (la Nr. puls = 100 imp/punct, $I = 48$ A) o linie de defecte foarte mică, câteodată alcătuită dintr-un singur defect.

Totuși, la fiecare din aceste prelucrări s-a remarcat că defectele erau aleatoare în ceea ce privește poziția, orientarea, dimensiunea și numărul acestora (*figura 7.112*). Pe măsură ce energia absorbită în piesă creștea și defectele obținute în PMMA creșteau în dimensiune

Concluzii

Concluzionând cele de mai sus, s-a ajuns la concentrarea procesului de prelucrare prin marcarea cu laser asupra unui alt material (policarbonatul), care să permită obținerea unor rezultate experimentale repetitive. În cazul PMMA-ului astfel de analize nu au fost posibile datorită rezultatelor diferite obținute în aceleași condiții de prelucrare.

7.3.4.2. Cercetările experimentale pentru PC

a) prelucrare laser punctiformă

După cum s-a observat în *figura 7.16*, la PC (policarbonat) procesul de prelucrare cu laser este similar celui de la PMMA cu diferența că înălțimea piesei este doar de 12 mm. În acest material s-a marcat atât la suprafață cât și în interiorul piesei, în funcție de parametrii de lucru aleși. În urma prelucrării s-a format o suprafață tronconică de marcarea conform secțiunii A-A (*figura 7.16*) pentru care s-au măsurat ca funcții obiectiv D_{ext} – diametrul mediu exterior și respectiv D_{int} – diametrul mediu interior, diametre corespunzătoare volumului de material prelucrat la intrarea și respectiv ieșirea din zona de interacțiune fascicul laser - PC. Și în acest caz, de la computerul integrat în unitatea de lucru se transmite pe suprafața piesei sau în interiorul acesteia (în funcție de poziția planului de focalizare), un punct de diametrul 225 μm care reprezintă pata focală minimă.

În aceste condiții, conform *tabelului 7.34*, pentru factorii de influență semnificativi s-au stabilit următoarele valori:

- E_1 – frecvența F ,
- E_2 – puterea medie a radiației P ,
- E_3 – număr de impulsuri pe punct n ,
- E_4 – poziția planului de focalizare h_f
- E_5 – intensitatea curentului pentru flash I
- Y_{E1} – diametrul mediu exterior D_{ext} – funcție obiectiv.

- Y_{E2} – diametrul mediu interior D_{int} – funcție obiectiv.

Tabelul 7.34. Factorii de influență pentru prelucrarea prin marcarea cu radiație laser

Nd-YAG a PC

FI	E_1 [Hz]	E_2 [W]	E_3 [imp/pct.]	E_4 [mm]	E_5 [A]	FO	Y_E [mm]
	$E_{11} = 100$ $E_{12} = 1500$ $E_{13} = 5000$ $E_{14} = 10000$ $E_{15} = 15000$	$E_{21} = 11,8$ $E_{22} = 13$ $E_{23} = 17$ $E_{24} = 18,8$ $E_{25} = 34,9$ $E_{26} = 39,5$ $E_{21} = 41$ $E_{22} = 48,3$ $E_{23} = 42,7$ $E_{24} = 50,2$	$E_{31} = 10$ $E_{32} = 20$ $E_{33} = 50$ $E_{34} = 100$ $E_{35} = 200$ $E_{36} = 500$	$E_{41} = -4$ $E_{42} = -2$ $E_{43} = -1$ $E_{44} = 0$ $E_{45} = 2$ $E_{46} = 4$ $E_{47} = 6$ $E_{48} = 8$ $E_{49} = 10$ $E_{410} = 12$ $E_{411} = 14$ $E_{412} = 16$ $E_{413} = 18$ $E_{414} = 20$	$E_{51} = 45$ $E_{52} = 50$		Y_{E1} Y_{E2}

Deoarece pentru prelucrarea cu laser a PC nu s-a mai păstrat constantă valoarea intensității, s-a măsurat mai întâi puterea radiației laser funcție de variația intensității pentru diferite valori ale frecvenței, utilizându-se tot diafragma de 4 mm care asigură cea mai bună prelucrare (figura 7.113).

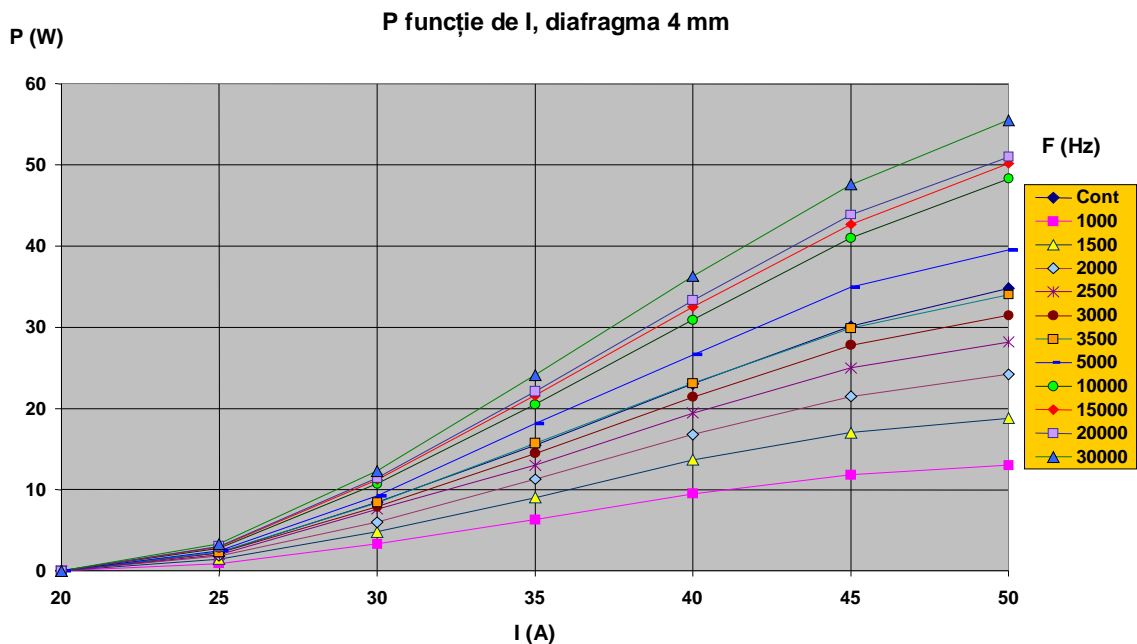
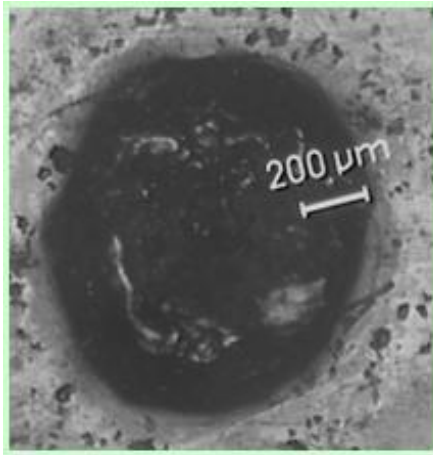


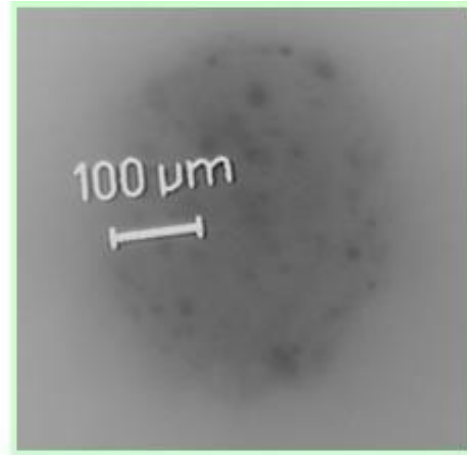
Figura 7.113. Variația puterii în funcție de intensitate pentru diferite valori ale frecvenței

Așa cum s-a mai precizat în această teză de doctorat, eșantionul de PC supus prelucrării cu radiație laser a fost deplasat manual pe masa de lucru pentru a obține o prelucrare normală la suprafața piesei. Pentru înălțimea piesei de 12 mm s-au ales

poziționări ale planului focal care au variat de la valori negative (situate sub suprafața inferioară a eșantionului) la valori pozitive (situate în piesă sau desupra suprafeței superioare a acesteia). Aceste variații au fost necesare pentru a marca în interiorul sau la suprafața polimerului.



a) marcarea la suprafață



b) marcarea în piesă

Figura 7.114. Diametrul mediu exterior și diametrul mediu interior măsurate la marcarea cu laser a PC

Pentru a analiza rezultatele experimentale s-au măsurat (vezi figura 7.16) diametrul exterior mediu (pentru marcarea la suprafață) și diametrul mediu interior – la baza mică a formei tronconice (pentru marcarea în interiorul piesei) figura 7.114. a) și b).

Astfel, în cadrul fiecărui experiment realizat, o parte din parametri au rămas constanți așa cum se va observa din tabelele și graficele următoare.

Tabelul 7.35. Variația diametrului exterior mediu funcție de numărul de impulsuri pe punct

Nr. puls [imp/pct.]	F [Hz]	I [A]	h_f [mm]	$D_{ext\ mediu}$ [μm]
500	15000	50	-1	731.57
200	15000	50	-1	631.57
100	15000	50	-1	615.78
50	15000	50	-1	552.63
20	15000	50	-1	473.68

Așadar pentru parametrii constanți: $I = 50\text{ A}$, $F = 15000\text{ Hz}$ și poziția planului focal la -1 mm sub piesă, odată cu creșterea numărului de impulsuri pe punct se remarcă o creștere a diametrului exterior mediu (tabelul 7.35 și figura 7.115).

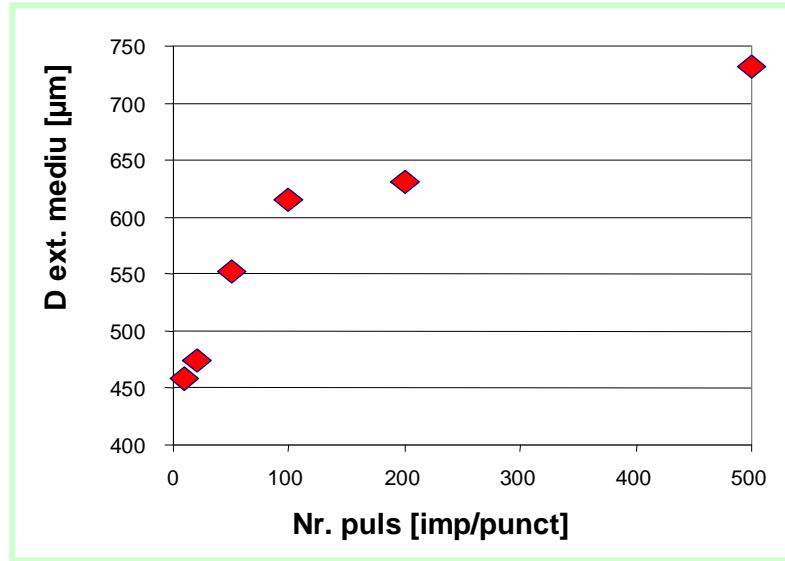


Figura 7.115. Variația diametrului exterior mediu funcție de Nr. puls pentru $I=50\text{ A}$, $F=15000\text{ Hz}$, $h_f=-1\text{ mm}$.

Tabelul 7.36. Variația diametrului exterior mediu funcție de poziția planului de focalizare

F [Hz]	Nr. puls [imp/pct.]	I [A]	h_f [mm]	$D_{\text{ext mediu}}$ [μm]
1000	200	45	-4	957.89
1000	200	45	-2	1026.31
1000	200	45	-1	952.63
1000	200	45	-1	973.68
1000	200	45	0	942.1
1000	200	45	2	994.73
1000	200	45	4	978.94
1000	200	45	6	973.68
1000	200	45	8	963.15
1000	200	45	10	984.21
1000	200	45	12	963.15
1000	200	45	14	947.36
1000	200	45	16	968.42
1000	200	45	18	947.36
1000	200	45	20	921.05

Dacă păstrăm constanți parametrii: frecvență, nr. puls și intensitate, modificând doar poziția planului de focalizare se va constata o scădere a diametrului exterior mediu pe măsură ce poziția planului focal crește (figura 7.116).

Din figura 7.117. se poate observa că diametrul exterior mediu scade odată cu creșterea frecvenței, caz în care nr. pulsului, intensitatea și poziția planului focal rămân parametri constanți în proces.

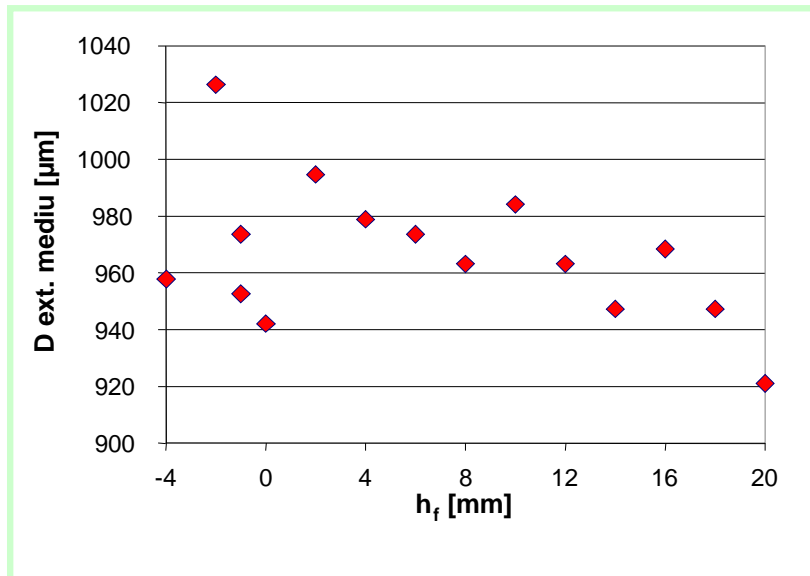


Figura 7.116. Variația diametrului exterior mediu funcție de h_f pentru $I=45$ A, $F=1000$ Hz, Nr. puls =200 imp/pct.

Tabelul 7.37. Variația diametrului exterior mediu funcție de frecvență

F [Hz]	Nr. puls [imp/pct.]	I [A]	hf [mm]	Dext mediu [μm]
1000	200	45	-1	973.68
1500	200	45	-1	952.63
5000	200	45	-1	831.57
10000	200	45	-1	710.52
15000	200	45	-1	389.47

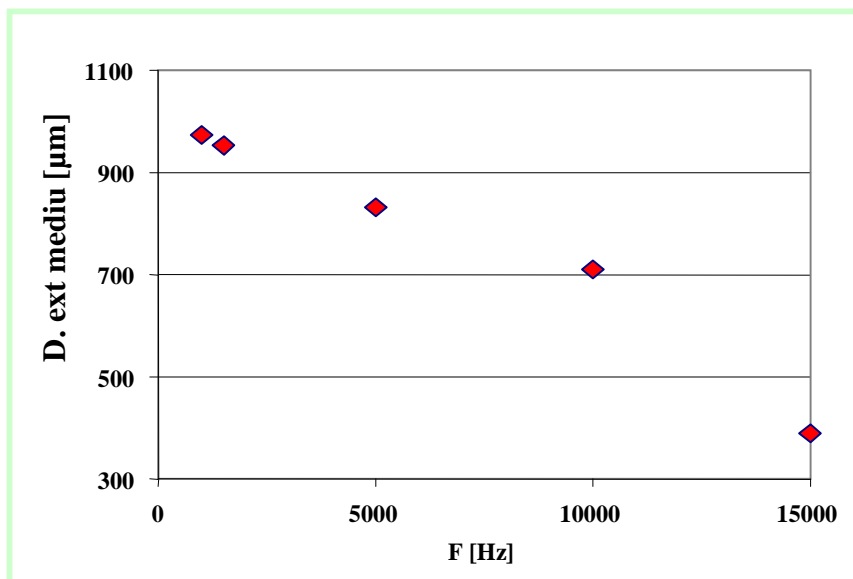


Figura 7.117. Variația diametrului exterior mediu funcție de frecvență pentru $I=45$ A, $h_f = -1$ mm, Nr. puls =200 imp/pct.

Conform *figurii 7.118*, se remarcă o scădere a diametrului interior mediu pe măsură ce planul de focalizare se poziționează deasupra eșantionului ce urmează a fi prelucrat, parametrii ca frecvența, nr. puls și intensitate rămânând constanți.

Tabelul 7.38. Variația diametrului interior mediu funcție de poziția planului de focalizare

F [Hz]	Nr. puls [imp/pct.]	I [A]	h _f [mm]	Dint mediu [μm]
15000	6	50	-4	434.21
15000	6	50	-1	415.78
15000	6	50	2	328.94
15000	6	50	6	260.52

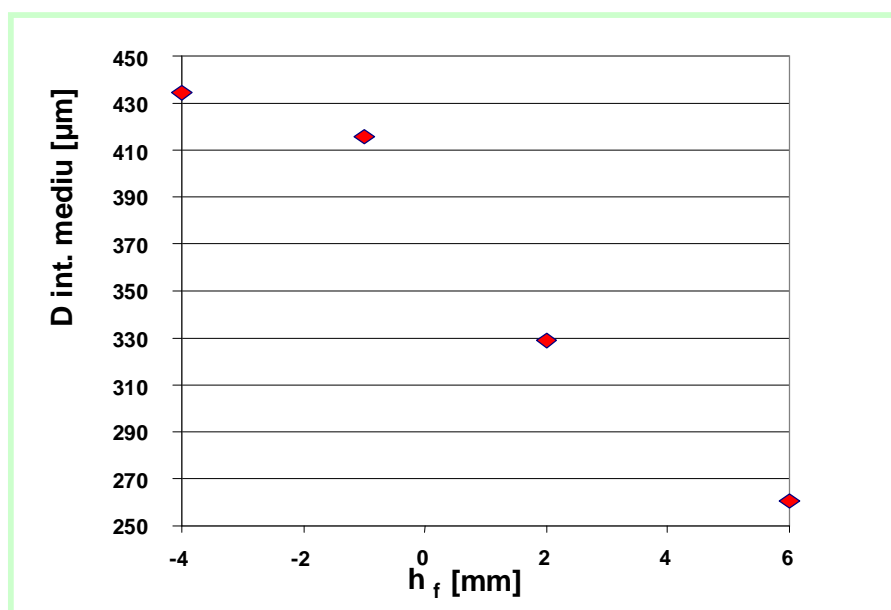


Figura 7.118. Variația diametrului interior mediu funcție de h_f pentru I=50 A, F=15000 Hz, Nr. puls =6 imp/pct.

Concluzii

Datorită înălțimii mici a semifabricatelor (12 mm), cu toată gama de poziționări ale planului de focalizare, nu se poate vorbi doar de marcarea cu laser în interiorul piesei ci de o marcarea exterioară care se termină în profunzimea piesei sau doar marcarea exterioară fără a intra și în profunzimea piesei.

Rezultatele experimentale în această situație arată că, o influență semnificativă asupra diametrului interior și exterior mediu o au frecvența, poziția planului de focalizare și numărul impulsurilor.

Faptul că, PC s-a comportat mult mai bine la marcarea cu radiație laser decât PMMA-ul, a făcut ca studiul să se dezvolte spre prelucrare laser după contur, mai

concret, o prelucrare laser liniară care poate duce ulterior și la prelucrări complexe după contur definit.

b) prelucrare laser liniară

Deoarece o înălțime a piesei de 12 mm nu era suficientă, pentru observarea prelucrării în PC, marcarea s-a realizat pe o înălțime de 30 mm, trasându-se linii paralele pe lățimea de 12 mm a eșantionului (conform *figurii 7.17*).

Astfel, fasciculul laser acționează liniar, cu o anumită viteză de prelucrare, iar prin modificarea parametrilor de intrare în procesul de prelucrare în PC se evidențiază un volum de material prelucrat pe diverse adâncimi ale piesei (notat în continuare cu L – lungimea liniei formate în interiorul piesei).

De la computerul integrat în instalația laser s-a trimis către eșantionul ce urma a fi prelucrat un set de 5 sau 7 linii, pentru fiecare linie în parte stabilindu-se diferiți parametri de intrare.

În urma încercărilor efectuate sau tras câteva concluzii importante:

- prelucrările s-au efectuat cu diafragma de 4 mm
- la viteze mari (care tind spre maxim – *tabelul 7.6 b*), volumul prelucrat prezintă întreruperi repetate la intervale egale (care sunt mai mari cu cât frecvența e mai mică)
- cu cât frecvența crește, volumul de material marcat devine mai vizibil (are loc o carbonizare mai puternică a materialului). Acest lucru se observă și la creșterea intensității.
- o intensitate prea mică nu permite prelucrarea acestui material
- când frecvența crește L scade
- prelucrarea la aceleași parametri are repetitivitate și reproductibilitate foarte bună
- cu cât viteza e mai mică, volumul prelucrat e mai mare, iar L e mai mare
- când h_f – înălțimea planului de focalizare crește, L scade, marcarea realizându-se la suprafață.

Din considerentele de mai sus s-au ales pentru marcarea liniară cu radiație laser următorii factori de influență (*figura 7.119*).

Pentru a stabili importanța factorilor de influență în acest proces de prelucrare s-a aplicat metoda balanței aleatoare (*vezi capitolul 6*), fiecărui factor atribuindu-se 4 niveluri de variație (*tabelul 7.39*).

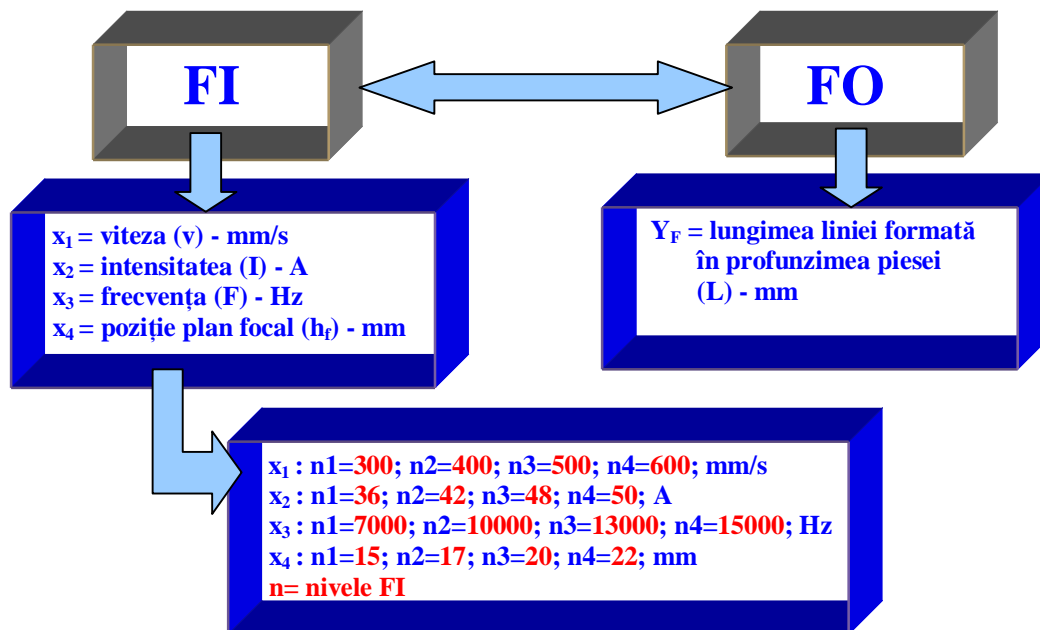


Figura 7.119. Factorii de influență și funcția obiectiv la marcarea liniară a PC

Tabelul 7.39. Metoda balanței aleatoare pentru cei 4 factori de influență ai prelucrării prin marcarea liniară cu radiație laser a PC

Nr. Încercare	Nivel factor de influență				Valoare FO $y - L$ [mm]	Valoare corectată $y' (x_2)$	Valoare corectată $y'' (x_3)$
	x_1	x_2	x_3	x_4			
1	3	2	4	1	16,33	18,3243	21,7343
2	4	4	2	2	26,77	21,1593	20,4775
3	4	1	2	3	16,53	22,4093	21,7275
4	2	3	1	4	24,63	22,3668	18,3937
5	1	4	4	1	21,64	16,0293	19,4393
6	4	3	2	2	25,57	23,3068	22,6250
7	2	3	3	3	22,18	19,9168	21,1618
8	2	1	3	4	13,67	19,5493	20,7943
9	2	4	1	1	32,57	26,9593	22,9862
10	3	4	2	2	26,81	21,1993	20,5175
11	1	1	4	3	12,54	18,4193	21,8293
12	1	2	3	4	19,15	21,1443	22,3893
13	3	3	3	1	22,02	19,7568	21,0018
14	3	2	4	2	16,94	18,9343	22,3443
15	4	2	1	3	24,95	26,9443	22,9712
16	1	1	1	4	19,09	24,9693	20,9962
Valoarea globală pentru y					21,3368	21,3368	21,3368

Rezultatele calculelor în cele trei etape de ierarhizare, precum și ordinea de importanță a celor patru factori analizați sunt date în tabelul 7.40.

Ținând cont de FO (L – adâncimea liniei formate în profunzimea piesei) și de faptul că s-a dorit ca această linie să rămână în interiorul PC (marcare în interiorul

polimerului), dintre cele 16 încercări propuse pentru balanța aleatoare, s-a ales încercarea 12 ca fiind cea mai reprezentativă prelucrare în jurul căreia s-a aplicat experimentul factorial complet pentru cei 4 FI de mai sus [34].

Tabelul 7.40. Ierarhizarea factorilor de influență

Etapa	Nivel FI	Valoarea medie a FO - Y			
		x1	x2	x3	x4
I	1	18.105	15.4575	25.31	23.14
	2	23.2625	19.3425	23.92	24.0225
	3	20.525	23.6	19.255	19.05
	4	23.455	26.9475	16.8625	19.135
	DV	5.35	11.49	8.4475	4.9725
II	1	20.1405	-	25.3099	20.2674
	2	22.198	-	22.0186	21.1499
	3	19.5536	-	20.0918	21.9224
	4	23.4549	-	17.9268	22.0074
	DV	3.9013	-	7.3831	1.74
III	1	21.1635	-	-	21.2904
	2	20.834	-	-	21.491
	3	21.3994	-	-	21.9224
	4	21.9503	-	-	20.6433
	DV	1.1163	-	-	1.2791
Ierarhizare FI		4	1	2	3

S-a optat astfel pentru un experiment factorial complet 2^4 ce presupunea 16 încercări și pentru care pe baza informațiilor obținute, s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului inferior și superior, precum și intervalele de variație ale FI, sintetizate în tabelul 7.41.

Tabelul 7.41. Alegerea domeniilor de variație a FI pentru experimentul factorial complet 2^4

Factorii de influență	x ₁ [mm/s]	x ₂ [A]	x ₃ [Hz]	x ₄ [mm]
Nivelul zero	300	42	13000	21
Intervalul de variație	10	1	500	1
Nivelul superior	310	43	13500	22
Nivelul inferior	290	41	12500	20

Funcția de răspuns căutată este L – lungimea liniei formate în interiorul PC în mm. Modelul experimental este o funcție de gradul I cu forma generală:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j \quad (7.29)$$

în care x₁-x₄ – factorii de influență

b₀-b₄ – coeficienții de regresie.

Tabelul 7.42. Matricea program a experimentului factorial complet 2^4 analizat

Nr. încercare	Nivel factor de influență					Simbolizare	FO y	\bar{y}
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄			
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	22,28	22,6100
2	1	1	-1	-1	-1	a	22,88	22,3875
3	1	-1	1	-1	-1	b	24,51	23,6075
4	1	1	1	-1	-1	ab	23,56	23,3850
5	1	-1	-1	1	-1	c	22,74	23,0350
6	1	1	-1	1	-1	ac	23,29	22,8125
7	1	-1	1	1	-1	bc	24,67	24,0325
8	1	1	1	1	-1	abc	21,75	23,8100
9	1	-1	-1	-1	1	d	20,70	21,2425
10	1	1	-1	-1	1	ad	21,00	21,0200
11	1	-1	1	-1	1	bd	22,35	22,2400
12	1	1	1	-1	1	abd	21,23	22,0175
13	1	-1	-1	1	1	cd	20,23	21,6675
14	1	1	-1	1	1	acd	23,10	21,4450
15	1	-1	1	1	1	bcd	23,62	22,6650
16	1	1	1	1	1	abcd	22,51	22,4425

În tabelul 7.42. este prezentată matricea program a experimentului factorial complet 2^4 cu 4 factori de influență.

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [1,6, 87]. S-au determinat conform modelului matematic impus:

- coeficienții de regresie pentru polinomul de gradul I (tabelul 7.43.);
- influența FI și interacțiunile semnificative dintre factori;
- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației FO când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (figura 7.120.);
- compararea valorilor măsurate cu cele estimate, la o precizie de estimație de 89,96% (figura 7.121.);
- suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență (figurile 7.122 - 7.125).

Valorile coeficienților de regresie din tabelul 7.43, fac ca forma modelului matematic polinomial (7.4) pentru FO - Y_F să devină:

$$Y_F = -499.28 + 2.15275A + 20.825B - 6.295 \cdot 10^{-3}C - 19.2288D - 0.065125AB + 7 \cdot 10^{-6}AC + 0.022875AD - 2 \cdot 10^{-4}BC + 0.08625BD + 6.2 \cdot 10^{-4}CD \quad (7.30)$$

Semnul „-”, aflat în fața variabilelor independente frecvența radiției laser (C) respectiv a poziției planului focal (D), precum și în fața coeficienților de regresie

aferenți interacțiunilor de ordin doi dintre viteza de deplasare a fasciculului laser (A) și intensitatea radiației laser (B), respectiv dintre intensitatea radiației laser (B) și frecvența radiației laser (C) din tabelul 7.43 și respectiv expresia polinomului de regresie (7.30), arată că influența acestora tinde să diminueze valoarea funcției obiectiv analizate.

Tabelul 7.43. Valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic analizat

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b_0	-499.28	b_{13}	$7 \cdot 10^{-6}$
b_1	2.15275	b_{14}	0.022875
b_2	20.825	b_{23}	$-2 \cdot 10^{-4}$
b_3	$-6.295 \cdot 10^{-3}$	b_{24}	0.08625
b_4	-19.2288	b_{34}	$6.2 \cdot 10^{-4}$
b_{12}	-0.065125		

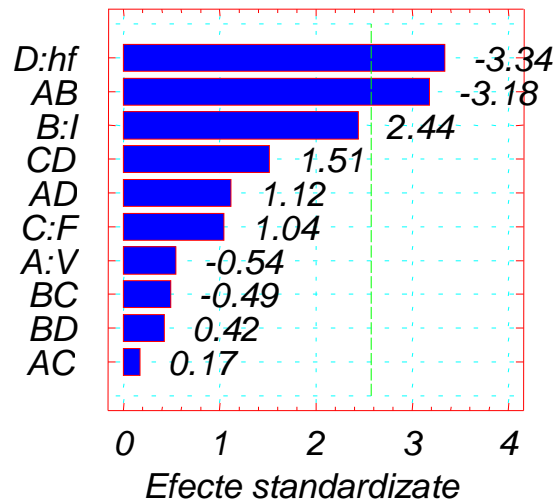


Figura 7.120. Histograma efectelor variabilelor independente asupra funcției obiectiv Y_F – adâncimea liniei formate în profunzimea piesei în [mm]

Histograma efectelor variabilelor independente asupra funcției obiectiv prezentată în figura 7.120, permite determinarea factorilor care afectează în cea mai mare măsură adâncimea liniei formate în profunzimea piesei Y_F , care după cum se poate observa sunt: poziția planului focal (D), urmată de interacțiunea de ordinul doi dintre factorii viteza de deplasare a fasciculului laser și respectiv intensitatea radiației laser (AB). Astfel, dacă se elimină influențele ne semnificative, expresia polinomului de regresie (7.30) devine:

$$Y_F = -499.28 - 19.2288D - 0.065125AB \quad (7.31)$$

Precizia de estimare a modelului matematic de 89,96%, este confirmată și de figura 7.121, unde se observă o concordanță relativ bună între valorile estimate cu ajutorul modelului polinomial adoptat și cele rezultate în urma experimentului.

O analiză mai bună a rezultatelor experimentale pentru prelucrarea liniară cu radiație laser a policarbonatului este dată de curbele de răspuns prezentate în figurile 7.122, 7.123, 7.124, 7.125.

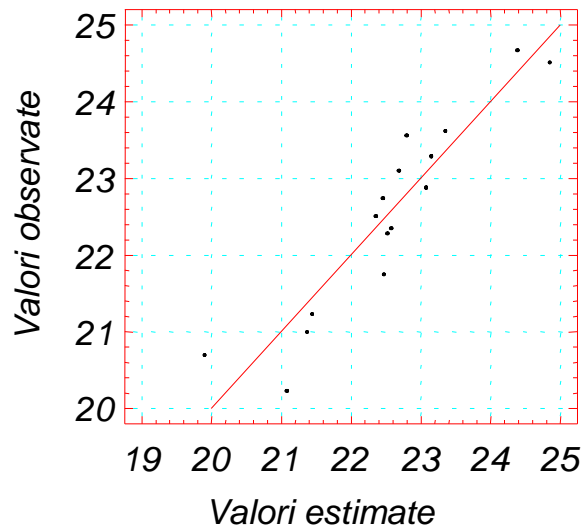


Figura 7.121. Precizia de estimare a modelului matematic pentru funcția obiectiv Y_F – adâncimea liniei formate în profunzimea piesei

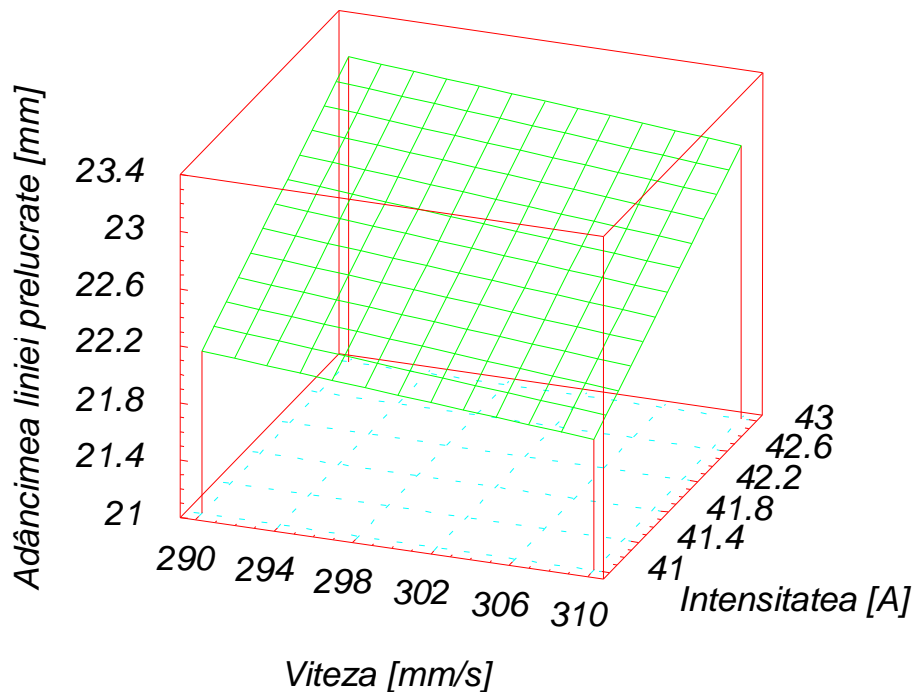


Figura 7.122. Influența vitezei de prelucrare și a intensității radiației laser asupra funcției obiectiv Y_F

Așa cum se poate remarca și din figura 7.122, adâncimi mici ale liniei prelucrate în policarbonat obținem pentru valori mari ale vitezei de prelucrare și respectiv valori mici ale intensității curentului necesar declanșării flash-ului, iar pe măsură ce viteza scade și intensitatea curentului crește, adâncimea liniei prelucrate crește.

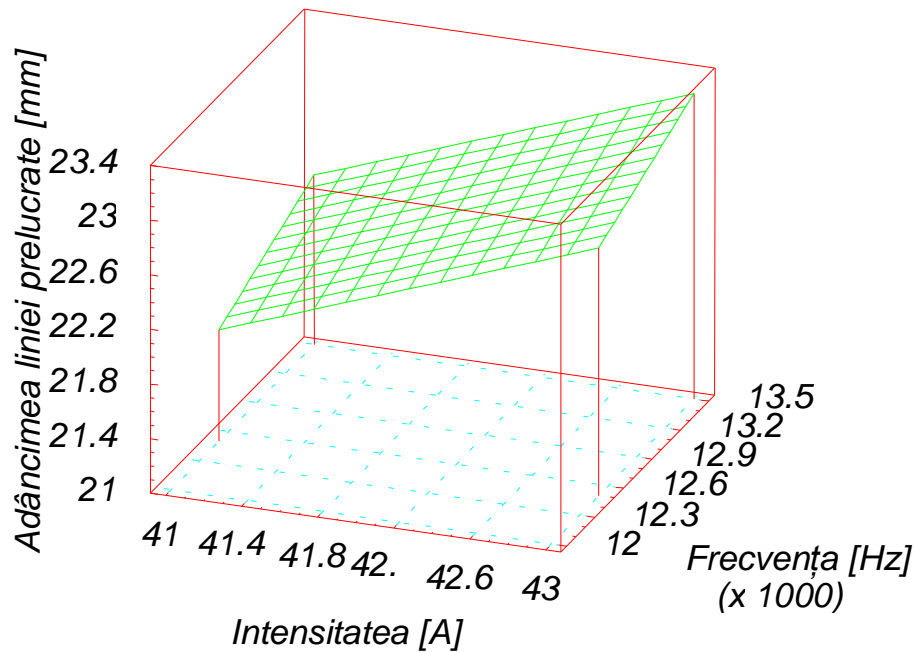


Figura 7.123. Influența intensității curentului pentru flash și a frecvenței asupra funcției obiectiv Y_F

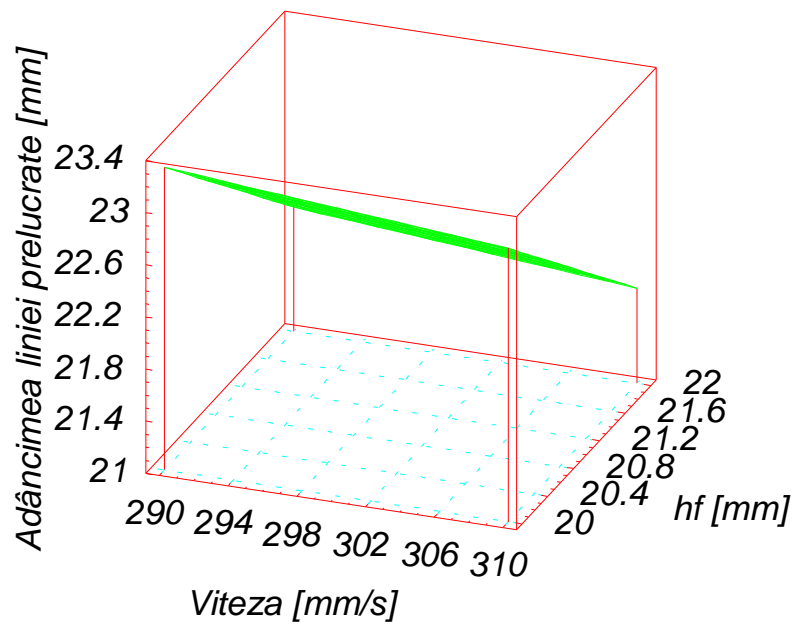


Figura 7.124. Influența vitezei de prelucrare și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_F

Cu cât valoarea celor doi factori de influență frecvența radiației laser și respectiv intensitatea crește deci puterea radiației laser crește, adâncimea liniei prelucrată în policarbonat este mai mare, așa cum se arată și în figura 7.123.

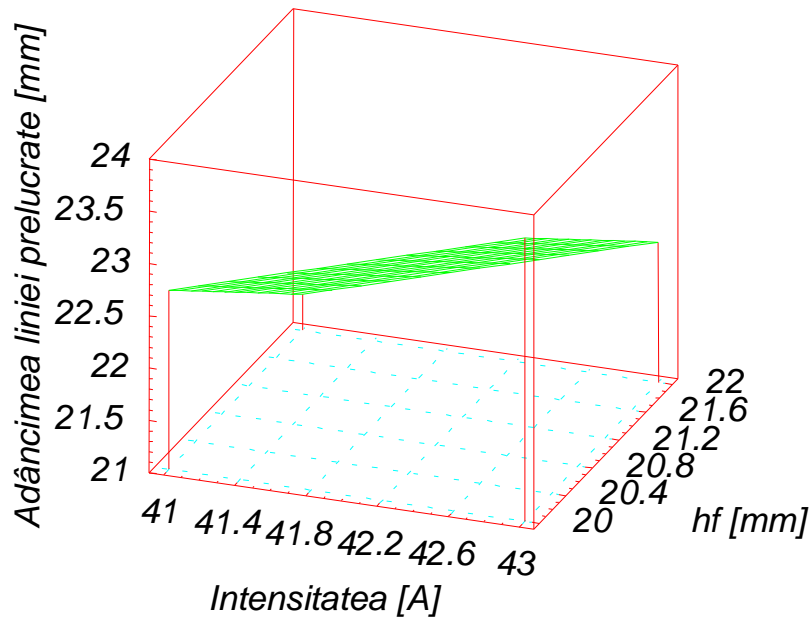


Figura 7.125. Influența intensității curentului pentru flash și a poziției planului focal asupra funcției obiectiv Y_F

În ceea ce privește influența celor doi factori: viteza de prelucrare și poziția planului de focalizare se poate remarca o micșorare a adâncimii liniei prelucrate în acest polimer odată cu creșterea valorii acestora (figura 7.124). Adâncimi mari ale liniei prelucrate se pot obține când cei doi factori de influență au valori mici, adică valori mici ale vitezei de prelucrare iar poziția planului focal în jurul valorii de 20 mm față de baza piesei de înălțime 30 mm.

Când intensitatea curentului pentru flash este mică (figura 7.125) se obțin valori mici ale adâncimii liniei prelucrate în policarbonat pentru valori mari ale înălțimii planului focal. Valori mari ale funcției obiectiv se înregistrează atunci când intensitatea curentului pentru flash crește iar poziția planului focal coboară spre valori mai mici.

Concluzii

Așadar, deoarece intenția acestui studiu era de a arăta care sunt valorile parametrilor de intrare (din domeniile de variație alese pentru această situație) în cazul procesului de prelucrare prin marcarea cu radiație laser, care să permită obținerea unui

contur prelucrat în interiorul policarbonatului, se poate spune că această condiție este îndeplinită dacă:

- intensitatea curentului pentru flash are valori mici
- viteza de prelucrare tinde spre valori mari reducând astfel volumul de material prelucrat
- frecvența radiației laser scade
- iar poziția planului de focalizare se deplasează spre valoarea de 20 mm din înălțimea piesei prelucrate (de 30 mm).

8. ANALIZA SPECTROFOTOMETRICĂ A SORTURILOR DE STICLĂ OTICĂ PRELUCRATE

Acest capitol se referă la o metodă relativ nouă care nu a mai fost aplicată la noi în țară în astfel de situații, tocmai datorită necesității unui spot de lumină de dimensiuni mici care duce la o focalizare mai concretă, pe arii mici a piesei. Datorită aparatelor de măsură utilizate până în prezent la noi în țară, măsurările spectrofotometrice s-au făcut în general pentru determinarea indicelui de reflexie n , a absorbției sau transmitanței pentru diferite materiale plastice utilizate în industria constructoare de mașini - la faruri, dar spoturile de lumină au fost de dimensiuni mai mari de 25 mm.

După cum s-a văzut deja, prelucrările făcute cu radiație laser în sticle au diametre sub 1 mm, deci, în această situație ar fi fost necesar un spot de lumină mult mai mic sau o dirijare localizată a spotului spre zona supusă prelucrării.

Cu sprijinul Catedrei Electricitate, Magnetism, Corp Solid și Știința Materialelor de la Universitatea de Vest din Timișoara, Facultatea de Fizică, care ne-a pus la dispoziție aparatura necesară, a fost posibilă efectuarea analizei spectrofotometrice pentru sorturile de sticlă optică prelucrate. În cadrul acestei catedre, măsurările spectrofotometrice s-au aplicat pentru:

- identificarea componentelor produselor medicamentoase,
- analiza tensidelor (prin variația tensiunii superficiale - detergenți),
- analiza amestecurilor (hidrocarburi, fenoli, acizi carboxilici, esterii, alcoolii), a coloranților, a plastifiantilor,
- urmărirea procesului tehnologic (dispariția sau apariția picurilor – vîrfurilor), optimizări ale condițiilor de reacție,
- analiza spectrofotometrică a sticlelor optice.

Aparatul de măsură utilizat se numește spectrofotometru și este un instrument optic care servește la obținerea spectrelor de emisie sau de absorbție ale substanțelor, cu ajutorul căruia se determină atât lungimile de undă ale liniilor spectrale, cât și intensitățile acestor linii prin comparare cu liniile unui spectru cunoscut.

Analiza spectrofotometrică se bazează deci pe principiul emiterii de la o sursă de lumină a două spoturi, unul comparativ iar celălalt specific măsurării absorbției sau transmitanței substanței sau materialului studiat (figurile 8.1 și 8.2).

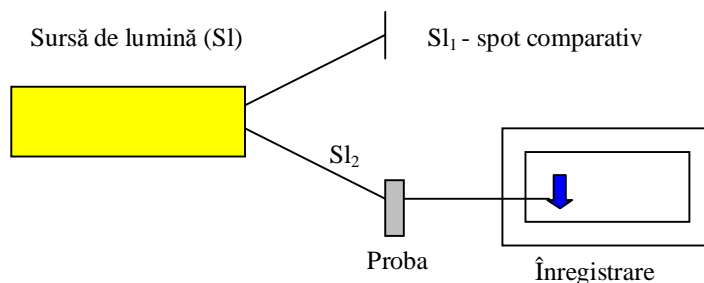


Figura 8.1. Schema de principiu a funcționării spectrofotometrelor

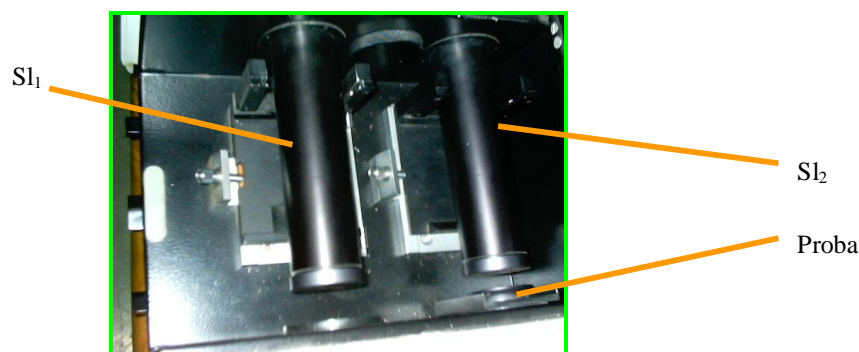


Figura 8.2. Modul de poziționare al probei în spectrofotometru

Piesele BK7, SF5, TF101 și sticla normală au fost analizate spectrofotometric în diferite ipostaze:

- eșantioane neprelucrate cu radiație laser și neacoperite cu straturi dielectrice sau metalice, considerate “piese etalon”;
- eșantioane prelucrate cu radiație laser dar neacoperite cu straturi dielectrice sau metalice;
- eșantioane prelucrate cu radiație laser și acoperite cu straturi dielectrice sau metalice la suprafața de interacțiune a materialului cu fasciculul laser, pentru mărirea sau micșorarea cantității de radiație laser absorbită în material, care să ducă la prelucrare;
- eșantioane prelucrate cu radiație laser, neacoperite cu straturi dielectrice sau metalice dar acoperite cu hârtie neagră astfel încât să rămână în spotul de lumină care realizează analiza spectrofotometrică doar alezajul prelucrat;

- eșantioane prelucrate cu radiație laser, acoperite cu straturi dielectrice sau metalice la suprafața de interacțiune a materialului cu fasciculul laser și acoperite cu hârtie neagră pentru localizarea alezajului prelucrat.

În cercetările efectuate s-au utilizat două aparate de măsură: Specord UV-Vis (figura 8.4) și Specord 75 IR (figura 8.3) de proveniență Carl Zeiss Jena, Germania, primul fiind folosit pentru măsurători în domeniul ultraviolet-vizibil iar cel de-al doilea în infraroșu. Astfel s-a putut face un studiu comparativ între măsurătorile efectuate pentru probele prelucrate și rezultatele deja existente în literatura de specialitate, prezentate în capitolul 5.



Figura 8.3. Aparatul de măsură Specord 75 IR pentru infraroșu



Figura 8.4. Aparatul de măsură Specord UV VIS pentru ultraviolet și vizibil

Cu ajutorul celor două aparate s-au făcut următoarele înregistrări care se referă la absorbanta sau transmitanța materialelor studiate (Anexele A1-A9). În urma analizelor spectrofotometrice s-au constatat următoarele:

- *Anexa A1* – Absorbanta sortului BK7 în ultraviolet:
 - (1) pentru eșantionul etalon BK7 de 2 mm grosime, neprelucrat cu radiație laser și neacoperit cu depuneri de straturi absorbante sau reflectante pentru amorsarea radiației laser în timpul prelucrării, s-a trasat spectrul de absorbție în UV. Se observă că acest material prezintă un maxim de transmitanță de 50% pentru $\lambda = 0,215 \mu\text{m}$ și are transmitanță între $\lambda = 0,205 \div 0,222 \mu\text{m}$. Acest sort de sticlă absoarbe integral radiația din spectrul ultraviolet între $\lambda = 0,222 \div 0,300 \mu\text{m}$. Materialul devine transparent pentru $\lambda > 0,310 \mu\text{m}$.
 - (2) pentru eșantionul BK7 de 3 mm grosime, prelucrat cu radiație laser dar neacoperit, nu s-au remarcat deosebiri semnificative ci doar o deplasare spre lungimi de undă mai mari cu 2,5 μm în UV îndepărtat a spectrului de absorbție (2) față de spectrul de absorbție etalon (1), datorată prelucrării materialului. În UV apropiat se constată diferența în transmitanță datorită grosimii mai mari a probei (2).
 - (3) pentru eșantionul de 2 mm grosime din același material, prelucrat cu radiație laser și acoperit cu PVC (strat absorbant depus pe suprafața sortului de sticlă pentru o mai bună amorsare a radiației laser), nu s-au observat diferențe semnificative față de spectrul de absorbție (1) în UV apropiat. În UV îndepărtat spectrul de absorbție (3) nu diferă de (2).
 - (4) eșantionul de 1 mm grosime din același material, prelucrat cu radiație laser și neacoperit prezintă în UV apropiat o transparență mai mare față de spectrul de absorbție (2) trasat pentru aceleași condiții dar cu o grosime mai mare a piesei.
- *Anexa A2* – Transmitanța sortului BK7 în infraroșu (IR):
 - (1) pentru un eșantion etalon de 2 mm grosime, neprelucrat și neacoperit, se constată o transmitanță de aproape 80% pentru $\lambda = 2,5 \div 2,7 \mu\text{m}$, după care aceasta scade, materialul având transmitanță

până la $\lambda = 4,4 \mu\text{m}$. Pentru lungimi de undă mai mari materialul devine absorbant, motiv pentru care BK7 va fi mai ușor de prelucrat cu o radiație laser de lungime de undă mai mare (ex.: laser cu CO_2 - $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$).

- (2) pentru eșantionul de *3 mm grosime, prelucrat* cu radiație laser și *neacoperit*, nu se observă deosebiri semnificative din punctul de vedere al aspectului spectrului de transmitanță trasat, dar se constată o diminuare la jumătate a transmitanței față de spectrul (1) etalon, ca urmare a creșterii grosimii probei.
 - (3) eșantionul de *2 mm grosime, prelucrat* cu radiație laser și *acoperit cu PVC*, prezintă câteva diferențe față de spectrul (1) al eșantionului etalon neprelucrat. Deși grosimea acestei probe este egală cu cea a probei etalon, apare datorită prelucrării, o scădere de 10% a transmitanței spectrului (3) față de spectrul (1) în domeniul $\lambda = 2,5\div 2,7 \mu\text{m}$, respectiv o scădere de 4% a transmitanței în domeniul $\lambda = 2,7\div 4,1 \mu\text{m}$. Dispariția picului de la $\lambda = 4,25 \mu\text{m}$ se explică prin acoperirea probei (3) cu PVC.
 - (4) pentru eșantionul BK7 de *1 mm grosime, prelucrat* cu radiație laser și *neacoperit*, transmitanța probei crește față de (1) în domeniul $\lambda = 4,5\div 5,1 \mu\text{m}$ prezentând și un pic la $4,85 \mu\text{m}$. În domeniul $\lambda = 2,7\div 4,3 \mu\text{m}$ dublarea transmitanței se datorează scăderii la jumătate a grosimii materialului. Deplasarea picului probei etalon de la $3,08 \mu\text{m}$ la $3,14 \mu\text{m}$ pentru curba (4) apare ca urmare a prelucrării cu radiație laser a probei.
- *Anexa A3* – Transmitanța sortului TF101 în IR
 - (1) pentru *eșantionul etalon* de *1 mm grosime, neprelucrat* cu radiație laser și *neacoperit* se constată o transmitanță de peste 80 % până la $\lambda = 2,7 \mu\text{m}$ după care aceasta scade, materialul fiind total absorbant după $\lambda = 4,8 \mu\text{m}$. Aspectul spectrului este asemănător cu cel existent în literatura de specialitate pentru sorturi de sticlă optică. Și în această situație se poate remarca că acest sort de sticlă

optică poate fi prelucrat cu o radiație laser de $\lambda > 5 \mu\text{m}$, deoarece pentru aceste lungimi de undă materialul absoarbe radiația, generând prelucrarea acestuia.

- (2) pentru eșantionul de *1mm grosime, prelucrat* cu radiație laser și *neacoperit*, nu se observă modificări semnificative în spectru datorită posibilității reduse de localizare a spotului de lumină IR pe un singur alezaj prelucrat, transmitanța obținută fiind de fapt o transmitanță globală a eșantionului. Astfel spectrul (2) copiază fidel aspectul spectrului (1).
- (3) pentru sortul de *grosime 1,5 mm, prelucrat* cu radiație laser și *acoperit cu PVC*, apar în primul rând diferențe datorate grosimii materialului prin deplasarea spectrului (3) spre transmitanță mai mică față de spectrul (1) și în aspectul spectrului apar modificări între $\lambda = 3,15 \div 3,60 \mu\text{m}$, acestea provenind de la stratul de PVC depus pe suprafața sortului de sticlă. În această situație aparatul practic a înregistrat transmitanța stratului de PVC.
- (4) pentru eșantionul de *1mm grosime, prelucrat* cu radiație laser, *neacoperit cu dielectric* dar *acoperit cu hârtie neagră (HN)* pentru a localiza o singură prelucrare, a fost trasat spectrul (4). În aceste condiții aparatul a înregistrat doar transmitanța hârtiei negre motiv pentru care spectrul (4) prezintă absorbantă maximă.
- (4') pentru curba (4) s-a folosit un atenuator denumit AVR (*figura 8.5*) în calea fasciculului de referință ce permite o mai bună vizualizare a spectrului.



Figura 8.5. Atenuator AVR pentru o vizualizare clară a spectrului trasat

- *Anexa A4* – Transmitanța sortului SF5 și a sticlei normale în IR
 - (1) pentru *sortul etalon SF5 de 1,5 mm grosime, neprelucrat și neacoperit* se constată o transmitanță mai mare de 80 % între $\lambda = 2,5 \div 2,7 \mu\text{m}$. După această valoare transmitanța scade, materialul tinzând spre absorbanță maximă către valori mari ale lungimii de undă ($> 4,5 \mu\text{m}$). Deci, și în acest caz materialul se poate prelucra mai bine cu o radiație laser de lungime de undă mai mare iar transmitanța este asemănătoare sortului TF101.
 - (2) pentru *sortul SF5 de 1,5 mm grosime, prelucrat cu radiație laser și acoperit cu dielectric fără a fi însă acoperit cu hârtie neagră*, nu s-au observat modificări semnificative față de spectrul (1) ceea ce demonstrează că pentru spectrul (2) nu s-a înregistrat transmitanța din zona prelucrată, ci doar transmitanța globală a materialului.
 - (3) *sortul SF5 de 1,5 mm grosime, prelucrat, acoperit cu dielectric și cu hârtie neagră* pentru localizarea unui alezaj, arată doar transmitanța hârtiei negre. Astfel, se constată o absorbanță mare pe tot domeniul de înregistrare al transmitanței.
 - (4) *sticla normală etalon de 3 mm grosime, neprelucrată, neacoperită și fără hârtie neagră* are alura spectrului asemănătoare cu cea a sortului SF5 etalon, neacoperit și neprelucrat (spectrul 1). Singura deosebire constă în diferența grosime a celor două materiale, pentru sticlă transmitanța fiind mai mică.
 - (5) pentru *sticla normală de grosime 3 mm, prelucrată prin tăiere laser și acoperită cu hârtie neagră* pentru localizarea prelucrării s-a constatat o aplanare a spectrului, o micșorare a transmitanței față de spectrul (4) etalon datorate hârtiei negre și dispariția picului de la $3,42 \mu\text{m}$ datorată prelucrării.
- *Anexa A5* – Transmitanța comparativă în IR a sortului BK7

- (1) *sortul BK7 etalon de 2 mm grosime, neprelucrat și neacoperit* are alura spectrului ca cea prezentată în anexa D2 pentru spectrul (1) corespunzătoare aceluiași sort.
 - (2) *sortul BK7 prelucrat de 1mm grosime și acoperit cu hârtie neagră* înregistrează o absorbantă ridicată datorată hârtiei negre, în acest caz localizarea alezajului fiind inefficientă.
 - (3) în cazul în care se face o comparație între spectrul (1) și spectrul (2) se înregistrează o oglindire a spectrului (1) în care transmitanța crește treptat fiind de 100% pentru $\lambda \geq 4,5 \mu\text{m}$.
- *Anexa A6 – Transmitanța BK7 în IR*
 - (1) pentru *sortul de 1 mm grosime, prelucrat cu radiație laser, neacoperit* dar cu alezajul localizat prin *acoperire cu hârtie neagră* se înregistrează o transmitanță mică și uniformă vizualizată mai bine cu ajutorul atenuatorului AVR, a spectrului (2) din anexa D5. În această situație nu există maxime sau minime de transmitanță ci doar absorbantă aproape constantă pe tot domeniul de înregistrare.
 - *Anexa A7 – Transmitanța în vizibil a sortului BK7*
 - (1) *sortul etalon de 2 mm grosime, neprelucrat, neacoperit și fără hârtie neagră* prezintă minime de absorbție la: 0,360 μm , 0,372 μm , 0,384 μm și între 0,428÷0,520 μm precum și absorbție zero în domeniul 0,555÷0,640 μm .
 - (2) pentru *sortul BK7 de 1 mm grosime, prelucrat cu radiație laser, neacoperit și cu alezaj localizat cu hârtie neagră* se constată o absorbție totală probabil și din cauza dimensiuni foarte mici a alezajului, dar mai ales datorită hârtiei care absoarbe radiația.
 - (3) în cazul sortului *BK7 de 1 mm grosime, prelucrat cu radiație laser și neacoperit*, la care alezajul e localizat prin *acoperire cu hârtie neagră* se remarcă o transmitanță relativ mică care este datorată pe de o parte hârtiei negre iar pe de altă parte diametrului mic al alezajului prelucrat. Minimul de absorbție de la 0,360 μm corespunzător spectrului (1) etalon dispare în acest caz datorită

prelucrării, iar constatarea prelucrării este posibilă din cauza unei localizări mai precise a spotului luminos pe zona prelucrată. Creșterea transmitanței pe domeniul cuprins între $0,430 \div 0,550 \mu\text{m}$ corespunde grosimii materialului în comparație cu cel etalon (1).

- (4) atunci când se folosește *atenuatorul* pentru sortul *BK7 de 2 mm grosime, prelucrat, acoperit cu PVC și cu alezaj localizat* prin intermediul *hârtiei neagre*, transmitanța este 0% până la $\lambda = 0,490 \mu\text{m}$ după care între $\lambda = 0,490 \div 0,578 \mu\text{m}$ crește până la 100%. Între $0,578 \div 0,640 \mu\text{m}$ transmitanța scade până la 80%, înregistrând minimul de transmitanță în jurul valorii $0,610 \mu\text{m}$. Acest minim de transmitanță corespunde PVC-ului. Între $0,640 \div 0,720 \mu\text{m}$ transmitanța crește din nou la 100% după care scade iar la valoarea 0 pentru $\lambda > 0,720 \mu\text{m}$.
- *Anexa A8 – Transmitanța în vizibil a sortului SF5 și a sticlei normale*
 - (1) în cazul sortului *SF5 etalon de 1,5 mm grosime, neprelucrat și neacoperit* se constată că pentru tot spectrul vizibil materialul are transmitanță de 80%.
 - (2) prezintă transmitanța *sortului SF5 de 1,5 mm grosime, prelucrat cu radiație laser, acoperit cu dielectric și hârtie neagră* pentru localizarea alezajului. Alura spectrului arată că datorită prelucrării acestui material transmitanța a scăzut până la $0,448 \mu\text{m}$. Între $0,555 \div 0,640 \mu\text{m}$ scăderea transmitanței se datorează PVC-ului.
 - (3) pentru *sticla normală etalon de 3 mm grosime, neprelucrată și neacoperită*, spectrul este asemănător spectrului (1) care aparține sortului SF5 etalon.
 - (4) spectrul este specific *sticlei de 3 mm grosime, prelucrate prin tăiere și acoperită cu hârtie neagră* la care se observă o scădere a transmitanței până la $0,362 \mu\text{m}$ față de spectrul (3) datorită prelucrării efectuate în material. Spectrul prezintă un minim de transmitanță în jurul valorii de $0,600 \mu\text{m}$ care se datorează PVC-ului.

- Anexa A9 – Transmitanța în vizibil a sortului TF101
 - (1) pentru sortul *TF101 etalon de 1 mm grosime, neprelucrat și neacoperit*, alura spectrului este asemănătoare curbelor (1) și (3) din anexa D8. Transmitanța este destul de ridicată atingând 85%.
 - (2) pentru sortul de *1 mm grosime, prelucrat cu radiație laser, neacoperit și cu alezajul localizat prin acoperire cu hârtie neagră*, se constată că transmitanța scade față de cea a spectrului (1) etalon până la 0,518 μm din cauza prelucrării. Între 0,534÷0,648 μm transmitanța crește la 100%.
 - (3) pentru sortul de *1,5 mm grosime din același material, acoperit cu dielectric, prelucrat cu radiație laser și cu alezaj localizat prin acoperire cu hârtie neagră* se remarcă diferențe datorate grosimi materialului la 0,800 μm , o scădere a transmitanței până la 80% între 0,480÷0,668 μm datorată dielectricului și o scădere a transmitanței pentru $\lambda \leq 0,377 \mu\text{m}$ dată de alezajul prelucrat.

9. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

9.1. Concluzii generale

Dacă se face o analiză de ansamblu a tezei de doctorat, ținând cont de capitolele prezentate anterior, se poate spune că obiectivele principale ale acesteia au fost în mare parte atinse. Cele mai semnificative dintre acestea sunt enumerate în cele ce urmează:

1. Înțelegerea condițiilor necesare pentru amorsarea radiației laser în sorturile de sticlă optică rezistente la radiații.
2. Studiarea proprietăților sorturilor sticlelor optice analizate în teza de doctorat astfel încât să se realizeze compatibilitatea dintre aceste materiale și radiația laser aplicată în vederea prelucrării.
3. Analiza efectelor de interes tehnologic induse de radiația laser în materialele optice parțial transparente.
4. Elaborarea schemei logistice a prelucrării cu radiație laser a materialelor optice parțial transparente.
5. Elaborarea unui model sistemic generalizat pentru prelucrarea materialelor optice cu fascicul laser.
6. Identificarea tuturor factorilor de influență care prezentau interes pentru prelucrarea cu fascicul laser a sorturilor de sticlă optică.
7. Determinarea legăturilor existente între grupele de variabile (variabile – mărimi de intrare, de ieșire și de reglare).
8. Stabilirea modelului matematic adecvat fiecărei prelucrări în parte având în vedere că, prelucrările sticlelor optice au fost efectuate pe trei instalații laser diferite: laseri Nd-sticlă, GT 1200 și CO₂ TER.
9. Concentrarea experimentelor spre prelucrarea prin găurire cu radiație laser a sorturilor de sticlă optică deoarece la operația de tăiere cu fascicul laser în aceste materiale s-au dezvoltat tensiuni interne foarte mari care au generat fisuri, ducând în final la distrugerea piesei în zona prelucrată.

10. Analiza proprietăților polimerilor optici (PMMA și PC) parțial transparenți în vederea identificării condițiilor necesare amorsării radiației laser la marcarea cu fascicul laser.
11. Tratarea acestor polimeri ca „sticle organice”, materiale care tind să înlocuiască sticlele optice studiate în această teză și datorită rezistenței mecanice mai bune a acestora.
12. Identificarea tuturor factorilor de influență semnificativi pentru procedeul de prelucrare prin marcarea cu radiație laser Nd-YAG a celor doi polimeri.
13. Elaborarea unui model matematic pentru prelucrarea liniară (după contur) prin marcarea cu radiație laser a policarbonatului.
14. Modelarea experimentală pentru fiecare material studiat în scopul evidențierii valorilor factorilor de influență pentru care acțiunea tehnologică prezintă interes.

Optimizarea procesului de prelucrare cu radiație laser a sorturilor de sticlă optică precum și a polimerilor optici parțial transparenți, nu este o operație simplă ci este mai degrabă un proces complex ce implică atât elemente cu caracter general dar mai ales cu caracter particular, corelate cu tipologia instalațiilor de prelucrare cu radiație laser și respectiv a produselor.

9.2. Contribuții personale

1. Aplicarea procedeului de prelucrare prin găurire cu radiație laser asupra unor sorturi de sticlă optică rezistente la radiații (BK7, SF5, TF101).
2. Aplicarea procedeului de prelucrare prin marcarea cu radiație laser asupra polimerilor parțial transparenți (sticle organice) PMMA și PC.
3. Efectuarea prelucrărilor de găurire cu radiație laser pe trei instalații laser cu parametrii de intrare diferiți pentru a putea observa comportamentul sorturilor de sticlă optică în cele trei situații.
4. Stabilirea factorilor de influență și funcțiilor obiectiv pentru fiecare procedeu de prelucrare în parte.

5. Conceperea unui model sistemic generalizat de prelucrare a sticlelor optice și a polimerilor optici parțial transparenți cu radiație laser.
6. Prelucrarea prin găurire a sticlelor optice pe instalația laser Nd-sticlă în regim de lucru pulsant ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$), caz în care a fost necesară acoperirea eșantioanelor cu straturi nanometrice de material dielectric sau metalic pentru amorsarea radiației laser astfel încât prelucrarea să fie posibilă.
7. Aplicarea unor experimente factoriale complete de ordinul 1 în cazul prelucrării cu radiație laser pe instalația laser GT 1200 atât pentru modul de lucru continuu cât și pulsant, pentru toate cele trei sorturi de sticlă optică analizate (BK7, SF5 și TF101).
8. Analiza efectelor induse de radiația laser în sorturile de sticlă optică la prelucrarea prin găurire efectuată pe instalația laser cu CO₂ GT 1200.
9. Proiectarea și realizarea unui experiment factorial compus și centrat de ordinul 2, cu patru factori de influență, care a furnizat modelul regresional pentru cele trei funcții obiectiv: abaterea de la circularitate la intrarea fasciculului în piesă, abaterea de la circularitate la ieșirea fasciculului din piesă și abaterea de la cilindricitate.
10. Analiza efectelor induse de radiația laser în sortul de sticlă optică BK7 la prelucrarea prin găurire efectuată pe instalația laser cu CO₂ TER.
11. Prelucrarea prin marcarea cu fascicul laser pe instalația laser Nd-YAG a PMMA-ului parțial transparent și analiza efectelor induse de radiația laser în acest polimer (funcția obiectiv fiind – înălțimea liniei de prelucrare formată din plane de clivaj care aveau poziție, orientare și dimensiuni aleatoare, fără a putea fi controlate riguros de FI ca mărimi de intrare în proces).
12. Prelucrarea prin marcarea punctiformă cu fascicul laser pe instalația Nd-YAG a policarbonatului transparent și analiza efectelor induse de radiația laser prin cele două funcții de răspuns alese: D_{ext} – diametrul exterior realizat la intrarea fasciculului în obiectul prelucrat și D_{int} – diametrul interior format în piesă.

13. Proiectarea și realizarea unui experiment factorial complet de ordinul 1, cu patru factori de influență, care a furnizat modelul regresional pentru funcția obiectiv – adâncimea liniei formate în profunzimea piesei.
14. O contribuție remarcabilă este analiza spectrofotometrică a sorturilor de sticlă prelucrate pe instalația laser GT 1200 cu CO₂ cu ajutorul spectrofotometrului care permite măsurarea spectrelor de emisie sau absorbție ale materialelor (substanțelor) și compararea acestora cu spectre cunoscute ale aceleiași substanțe. Astfel s-au putut identifica zonele prelucrate sau acoperite și variația transmitanței sau absorbției în funcție de λ .

Aspectele tratate în prezenta teză de doctorat încearcă să rezolve, în parte, problemele legate de optimizarea procesului tehnologic de prelucrare cu radiație laser a materialelor optice parțial transparente lăsând deschise noi direcții de cercetare și eficientizare a procesului de prelucrare dintre care pot fi enumerate:

- dezvoltarea cercetării spre prelucrarea prin tăiere cu radiație laser a acestor sorturi de sticlă optică rezistente la radiații,
- minimizarea tensiunilor interne ce pot să apară în sorturile de sticlă optică supuse prelucrării cu radiație laser prin încălzirea respectiv menținerea constantă a temperaturii eșantioanelor în timpul procesului de prelucrare,
- direcționarea acestor tehnologii de prelucrare către industrie și eficientizarea lor.

BIBLIOGRAFIE

1. Achim, Simona – *Modelarea procesului la prelucrarea cu fascicule laser a sticlelor optice*, Referat 2, Timisoara, 1999.
2. Achim, Simona – *Algoritmul cercetărilor teoretico-experimentale*, Referat 3, Timișoara, 1999.
3. Achim, Simona – *Sorturi de sticla optica. Compatibilitatea sticlelor optice cu radiația laser*, Referat 1, Timisoara, 1999.
4. Achim, Simona, Mnerie, D., Grozescu, I., - *Generalized Systemic Model of Laser Beam Processing of Optical Glass*, The American Ceramic Society Conference, 3-6 octombrie 1999, Ohio, SUA.
5. Achim Simona, Popovici, V. – *Considerații privind aplicațiile laserilor la prelucrarea sticlelor optice* – Conferință ARTN, Timișoara, 1999, Revista de tehnologii neconvenționale, nr. 2/1999, Ed. AUGUSTA, Timișoara, ISSN – 1454 – 3087.
6. Achim, Simona, Popovici, V. – *Efecte de interes tehnologic la prelucrarea unor sorturi de sticla optica cu radiatie laser*, CITN Brasov, 2000.
7. Achim Simona, Pillon, G., Ignat, S., Pilloz, M., Grevey, D. – *Internal defects in polycarbonate and polymethyl methacrylate produced by Nd:YAG laser irradiation*, Applications haute technologies – laser – et leur implication dans l’industrie européenne, Editura Politehnica Timișoara, 2002.
8. Achim Simona, Popovici, V., Cicală, E.F. – *Experimental model of laser drilling of sapphires*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” din Timișoara, Tom 45(59), Fasc. 1., 2000.
9. Benga, G.C. – *Contribuții la optimizarea procesului tehnologic privind prelucrarea în stare dură a oțelurilor aliate*, Teză de doctorat, Timișoara, 2002.
10. Bodea, R., Ionescu, C., Gruescu, C. – *Design of a CO₂ laser (10,6 μm) optical system*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VI (XVI), 2007, ISSN 1583-0691.

Bibliografie

11. Botizan, A. – *Theoretical studies about principles and modalities of quality assurance of surfaces processed by laser*, Simpozionul Internațional „Tinerii și Cercetarea Multidisciplinară”, Institutul de Sudură și Încercări de Materiale Timișoara, 2003.
12. Breaban, F., Coutouly, J.F., Deprez, P., Deffontaine, A. – *Study and construction of an homogeniser for high power laser beam*, Laser in Engineering, Gordon & Breach Science Publishers, Vol. 11, 2001, SUA.
13. Chui, G. H. – *Laser cutting of hot glass* - «Ceramic Bulletin», 1975.
14. Cicală, E.F. – *Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a materialelor*, Teză de doctorat, Timișoara, 1997.
15. Cicală, E.F. – *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*, Ed. Politehnica Timișoara, 1999.
16. Cicală, E.F. – *Metoda experimentelor factoriale*, Ed. Politehnica Timișoara, 2005.
17. Cicală, E.F., Botea, T. – *Algoritm de modelare experimentală a proceselor de prelucrare prin tehnologii neconvenționale. Aplicație – tăierea cu laseri.*, Conferința Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN, Asociația Română de Tehnologii Neconvenționale, Vol 1, 2001, Timișoara.
18. Cicală, E.F., Botea, T. – *Experimental modelling of nonconventional processing technology application – laser drilling*, Revista de Tehnologii Neconvenționale, Asociația Română de Tehnologii Neconvenționale, Nr. 2, 2001.
19. Cicală, E.F., Nichici, A., Vannes, A. B., Grevey, D., Jacrot, G. – *La méthode des plans d'expériences appliquée a l'optimisation du découpage par lasers*, Seminaire europeen „LASERAP'3” Ecole CNRS, Club Laser et Procédés, Sarlat, France, 1997.
20. Cicală, E.F., Nichici, A., Vannes, A. B., Grevey, D., Jacrot, G. – *Metoda experimentelor factoriale aplicată la optimizarea gravării cu laser*, Tehnologii Avansate pentru Noile Materiale, Editura Tehnică, TCMM, Vol. 26, 1998, București.

Bibliografie

21. Cicală, E.F., Zsivanov, Delia, Nichici, A. – *Off line multiresponse optimization of gas jet assisted, CO₂ laser cutting of polymethacrylate*, Conference on Optics ROMOPTO'97, The International Society for Optical Engineering, vol. SPIE 3405, 1997, București.
22. Constantinescu, I., Golumbovici, D., Militaru, C. – *Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice – aplicații din construcția de mașini*, Ed. Tehnică, București, 1980.
23. David, I., Cicală, E.F. – *Establishing the regression polynoms for the objective function that define the dimensional accuracy in case of laser drilling*, Conference on Optics ROMOPTO'97, The International Society for Optical Engineering, vol. SPIE 3405, 1997, București.
24. David, I. - *Cercetări privind parametrii tehnologici la prelucrarea cu laser a microsuprafețelor și interdependența acestora cu materialul supus prelucrării, Teză de doctorat*, Timișoara, 1985.
25. Drăgănescu, V., Velculescu, V.G. – *Prelucrări termice cu laseri*, Ed. Academiei R.S.R. București, 1986.
26. Dumitraș, C. Dan – *Laserii cu gaz*, Ed. Academiei RSR București, 1982.
27. Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I. – *Image Quality Optimization of an Achromatic Doublet Using Defocusing and Methods Optical OPD*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, Vol. XII, nr. 4/2003, ISSN 1453-0600.
28. Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I. – *Glass Choise for Achromatic Optical Systems*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, Vol. XII, nr. 4/2003, ISSN 1453-0600.
29. Han, Adelina-Alina – *High performance laser system*, Revista de tehnologii neconvenționale, nr. 2, 2005.
30. Han, Adelina-Alina, Grevey, D., Nichici, A., Pillon, G. – *Study of the polymer laser grooving process by using the analysis of variance method*, International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO, Laser Institute of America, 2005, Miami, U.S.A.

Bibliografie

31. Han, Adelina-Alina, Gubencu, D. – *Ablation des polymères et ses applications*, Revista de tehnologii neconvenționale, Asociația Română de Tehnologii Neconvenționale, nr. 1, 2002.
32. Han, Adelina-Alina, Gubencu, D. – *Rappel sur le mécanisme de dégradation du matériau irradié par laser*, Revista de tehnologii neconvenționale, Asociația Română de Tehnologii Neconvenționale, nr. 1, 2002.
33. Han, Adelina-Alina, Gubencu, D., Pillon G. – *A generalized structure based on systemic principles of the characteristic variables of materials laser processing*, Optics & Laser Technology, Elsevier Ltd., Vol. 37, 2005, Olanda.
34. Han, Adelina-Alina, Nichici, A., – *Procesarea materialelor cu laser, Index bibliografic*, Editura Politehnica Timișoara, 2007.
35. Han, Adelina-Alina, Pillon, G., Nichici, A., Gubencu, D., Grevey, D., Cicală, E. – *Study of the polymer laser grooving process using a complete factorial experiment*, Laser in Engineering, Gordon & Breach Science Publishers, Vol. 15, 2005, SUA.
36. Han, Adelina-Alina, Pillon, G., Vannes, B. – *Traitement de surface par faisceau laser d'un polycarbonate en vue d'application tribologique. Approche par les plans d'expériences*, Journées Francophones de Tribologie, L'Association Française de Mécanique GST Tribologie, 2004, Saint-Quen, Franța.
37. Hicks, C.K. – *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1982.
38. Ilie, Mariana, Kneip, J. C., Mattei, Simone, Nichici, Al. – *Through-transmission welding of polymers: effects of particles on laser beam scattering*, International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO 2006, Laser Institute of America, LMP 601, 2006, Miami - Florida, U.S.A.
39. Ilie, Mariana, Kneip, J. C., Mattei, Simone, Nichici, Al., Roze, C., Girasole, T. – *Soudage laser par transparence de polymères – effets de la diffusion*, Congres Française de Thermique, SFT 2006, Ile de Ré, Franța.
40. Ilie, Mariana, Kneip, J. C., Mattei, Simone, Nichici, Al., Roze, C., Girasole, T. – *Laser beam scattering effects in non-absorbent inhomogenous polymers*,

Bibliografie

- Optics and Laser in Engineering, Elsevier Ltd., vol. 45, 2007, S.U.A.
41. Ilie, Mariana, Pillon, G., Lemoine, F., Ignat, S., Vannes, A. B., Grevey, D. – *Deep etching of polycarbonates with a Q-switch Nd:YAG Laser*, Applications haute technologies – laser – et leur implication dans l'industrie européenne, Editura Politehnica Timișoara, 2002.
 42. Ionescu, C., Ncoară, I., Gruescu, C. – *Optimizarea parametrilor de proces pentru tăierea cu laser a roților dințate din material plastic, utilizând proiectarea robustă Taguchi*, International Symposium „Trends in European Agriculture Development”, Secțiunea 7, Resurse energetice și mașini pentru agricultură, Timișoara, 2006, ISSN 1221-5279.
 43. Ionescu, C., Pugna, A., Ncoară, I. – *Optimizarea parametrilor de proces a tăierii cu laser a roților dințate din materiale plastice utilizând proiectarea robustă Taguchi*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” Timișoara, seria Management, Inginerie Economică, Ingineria Transporturilor, Editura Politehnica, Timișoara, Tom 52(66), 2007, Fascicola 1, ISSN 1224-6050.
 44. Keiper, B., Exner, H., Löschner, U., Kuntze, T. – *Drilling of glass by excimer laser mask projection technique*, Journal of Laser Applications -- October 2000 -- Volume 12, Issue 5.
 45. Khaleeq-ur-Rahman, M., Shahbaz Anwar, Muhammad, Shahid Rafique, M., Waqas Haider, Khurram – *Laser induced exfoliation splashing in glass materials*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 255, Issue 2, February 2007.
 46. Kneip, J. C., Han Adelina, Mattei, Simone, Grevey, D. – *Numerical simulation of thermal branding of polymers with infrared laser*, International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, ICALEO, Laser Institute of America, 2004, San Francisco, U.S.A.
 47. Lallemand, G., Jacrot, G., Cicală, E., Grevey, D. – *Grooving by Nd-YAG laser treatment*, Journal of Material Processing Technology, Elsevier Ltd., No. 99, 2000, Olanda.
 48. Li, Y., Itoh, K., Watanabe, W., Yamada, K., Kuroda, D., Nishii, J., Jiang, Y. –

Bibliografie

- Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses*, Optics Letters, Vol. 26, Issue 23, 2001 Optical Society of America.
49. Maciulka, G.A. - *Lasernaia obrabotka stekla*, Moscova, «COBETCKOE PADNO», 1979.
 50. Mann, K., Wolff-Rottke, B., Müller, F. – *Cleaning of optical surfaces by excimer laser radiation*, Applied Surfaces Science 96-98 (1996) 463-468, 1996 Elsevier Science B.V.
 51. Mathieu, A., Shabadi, R., Deschamps, A., Suery, M., Mattei, S., Grevey, D., Cicală, E. F. - *Dissimilar material joining using laser (aluminium to steel using zinc-based filler wire)*, Optics & Laser Technology, Elsevier Ltd., No. 39, 2007, Olanda.
 52. Montgomery, D.C. – *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, Singapore, 1991.
 53. Nichici, Al. – *Evoluții semnificative în sistemele tehnologice laser*, Masa rotundă „Energiiile concentrate – suport al prelucrării termice a materialelor”, Ed. Politehnica Timișoara, 2004.
 54. Nichici, Al., ș. a. – *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Ed. Facla, Timișoara, 1983.
 55. Nichici, Al., Cicală, E.F. – *A new approach in the gas jet assisted, CO₂ laser cutting off line optimization*, International Conference of Lasers'97, The Society for Optical and Quantum electronics, New Orleans, SUA, 1998.
 56. Nichici, A., Cicală, E.F. – *Introduction in the Strategy of Materials Laser Cutting Process Optimization*, Séminaire européen LASERAP'4, Ecole CNRS, Tom 3, 2001, Les Hautes de Marquay, Franța.
 57. Nichici, Al., Cicală, E.F., Mee, R. – *Prelucrarea datelor experimentale*, Curs și aplicații, Timișoara, 1996.
 58. Nichici, Al., Popovici, V. – *Efecte de interes tehnologic induse prin acțiunea radiației laser*, Creativitatea în construcția, fabricarea și exploatarea automobilelor, Vol. I, Pitești, 1979.

Bibliografie

59. Nikumb, S., Chen, Q., Li, C., Reshef, H., Zheng, H.Y., Qiu, H., Low, D. – *Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers*, Thin Solid Films, Volume 477, Issues 1-2, 22 April 2005.
60. Popovici, V. – *Tehnologii în optica laser*, Ed. Mirton, Timisoara 1995.
61. Popovici, V., Nichici, Al. – *Precizia dimensională și de formă a microalezajelor prelucrate cu fascicule laser în semifabricate din rubine și safire*, Tg. Mureș, 1993.
62. Popovici, V., Nicoara, I. – *Sisteme optice laser. Componente. Materiale. Tehnologie.*, Ed. Mirton, Timisoara, 1998.
63. Pyda Marek – *Poly(methyl methacrylate), Amorphous Calculated Data*, 1997
64. Sakurai, Y., Nagasawa, K. – *Light emission associated with laser damage in silica glass and optical glass*, Journal of Non-Crystalline Solids 278 (2000) 69-74, 2000 Elsevier Science B.V.
65. Shah, L., Tawney, J., Richardson, M., Richardson, K. – *Femtosecond laser deep hole drilling of silicate glasses in air*, Applied Surface Science, Volume 183, Issues 3-4, 28 November 2001, Orlando, U.S.A.
66. Simionescu, C., Vasiliu-Oprea, C. – *Tratat de chimia compușilor macromoleculari* – E.D.P., București, 1973.
67. Stoica, V., Mattei Simone, Ignat, S., Andrzejewski, H., Grevey, D. – *PID Regulator for temperature control in industrial laser welding and surface treatment*, Applications haute technologies – laser – et leur implication dans l’industrie européenne, Editura Politehnica Timișoara, 2002.
68. Svelto, O. – *Principles of lasers*, Plenum, New York, 1998.
69. Taloi, D. – *Optimizarea proceselor tehnologice. Aplicații în metalurgie.*, Editura Academiei, București, 1987
70. Trașcă, T.I. – *Contribuții la optimizarea proceselor de fabricație a matrițelor cu miezuri din cristale sintetice pentru extrudarea pastelor făinoase*, Teză de doctorat, Timișoara, 2003.
71. Văduva, I. – *Analiză dispersională*, Ed. Tehnică, București, 1970.
72. Vega, F., Lupón, N., Armengol, J., Laguarda, F. – *Laser Application for Optical*

Bibliografie

- Glass Polishing*, SPIE, 1998.
73. Velceanu, C. I. – *Metode fizice de investigare a polimerilor* – Ed. Științifică București, 1992.
 74. Voiculescu, I. – *Contribuții privind optimizarea tehnologiei de prelucrare cu fascicul laser a monocristalelor din safire și rubine sintetice, Teză de doctorat*, Timișoara, 1997.
 75. Zamachtchikov, Y., Breaban, F., Vantomme, P., Deffontaine, A. – *Method of Evaluating the Strains and Residual Stresses in Laser Cutting*, Laser in Engineering, Old City Publishing Inc., Vol. 12, 2002, SUA.
 76. Zel'dovich, Y. B., Raizer, Y. P. - *Physics of shock waves and high temperature hydrodynamic phenomena.*, Academic Press, N. Y., 1967
 77. *** Abaqueplast Journal – *Distribution & Transformation, Matières Plastique*, 2000.
 78. *** *Colorless Optical Glass Catalog* – Mashpriborintorg, URSS – Moscow.
 79. *** *Dicționar cronologic al științei și tehnicii universale*, E.S.E. București, 1970.
 80. *** *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 10 (1963).
 81. *** MatWeb database – *Material Properties Data*, 2001.
 82. *** *Pliant de prezentare al firmei Rofin-Baasel Inc.* – 2001.
 83. *** *SCHOTT Optical Glass* – Catalog.
 84. *** SR ISO 31-0, 1994.
 85. *** SR ISO 31-3, 1995.
 86. *** SR ISO 1000, 1995.
 87. *** *STATGRAPHICS, Reference Manual*, Manustinc, 1992.
 88. *** http://www.ptsllc.com/polcarb_intro.htm.

DICȚIONAR DE ACRONIME ȘI NOTAȚII

TEM_{mn} – structura modală a radiației laser

IFTAR – Institutul de Fizica și Tehnologie a Aparatelor cu Radiații

UV – ultraviolet

HTP – Hoechst Technical Polymers

PC – policarbonat

PMMA – polimetacrilat de metil

PS – polistiren

PVC – policlorura de vinil

BK₇ – sticla optică bor cron 7

SF5 – flint greu 5 german

TF₁₀₁ – flint greu 101 rusesc

OK – kron special

OF – flint special

ZIT – zonă influențată termic

OP – obiectul de prelucrare

SiO₂ – sticla de silice

KrF – fluorura de kripton

Al – aluminiu

TRC-33 – sticlă optică crown albă

cw – regim de lucru continuu

cp – regim de lucru pulsant

I_L – intensitatea radiației laser

E – densitatea de energie

Dicționar de acronime și notații

λ – lungimea de undă

I – intensitatea

λ_t – conductivitatea termică

P_L – puterea laser

v – viteza la prelucrarea prin tăiere cu radiație laser

δ – distanța de la planul de focalizare la suprafața superioară a probei

h – grosimea eșantionului prelucrat

$2r_0$ – diametrul optim al fasciculului laser focalizat

T_g – temperatura de transformare

d – diametrul eșantionului prelucrat

n – indice de refracție

γ – coeficientul de dispersie

$\tau_{i\lambda}$ – factorul de transmisie spectrală internă

$\Phi_{e\lambda}$ – fluxul radiant

R_m – indicator pentru indicele de refracție al sticlei

α – coeficientul de dilatare termică liniară

ρ – densitatea specifică

E – modulul de elasticitate

G – modulul transversal

μ – coeficientul lui Poisson

B – coeficientul de tensiune optică

Δn – birefringența

δ – diferența drumului optic

σ_1 și σ_2 – tensiunile normale principale

s – grosimea sortului de sticlă

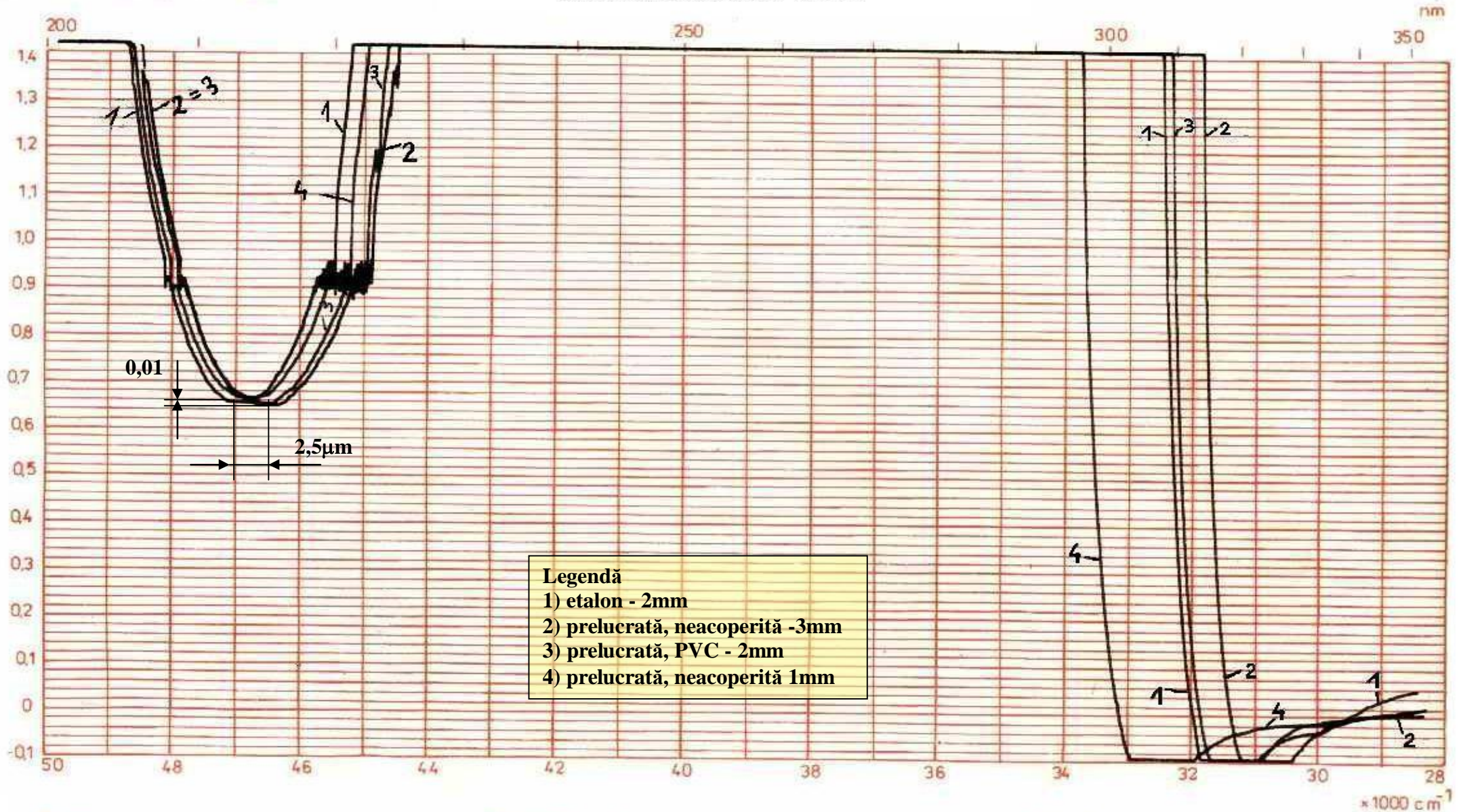
T_v – temperatura de tranziție a sticlei

Dicționar de acronime și notații

- T_{cu} – temperatura de curgere
- M – masa moleculară
- T_t – temperatura de topire
- T_p – temperatura suprafeței de prelucrat
- F – frecvența de repetiție a impulsurilor
- U – tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj
- v – viteza de prelucrare
- p – presiunea gazului de lucru
- q – debitul gazului de lucru
- g – grosimea materialului prelucrat
- X – factori de influență controlabili
- Z – factori de influență incontrollabili
- Y – funcții de răspuns
- Ra – rugozitatea
- FI – factori de influență
- FO – funcții obiectiv
- A, B, C, D, E, F – factori de influență
- hf – poziția planului de focalizare
- IR – infraroșu
- HN – hârtie neagră
- S_1, S_2 – suprafețe ale piesei de prelucrat
- L – adâncimea liniei formate în profunzimea piesei
- b – coeficient de regresie
- FL – fascicul laser
- $T_{tragere}$ – timpul de acționare al fascicului laserului
- Q_{gaz} – debitul gazului de lucru

SPECORD

ANEXA A1 ABSORBANTA BK7 IN UV



Legendă
1) etalon - 2mm
2) prelucrată, neacoperită - 3mm
3) prelucrată, PVC - 2mm
4) prelucrată, neacoperită 1mm

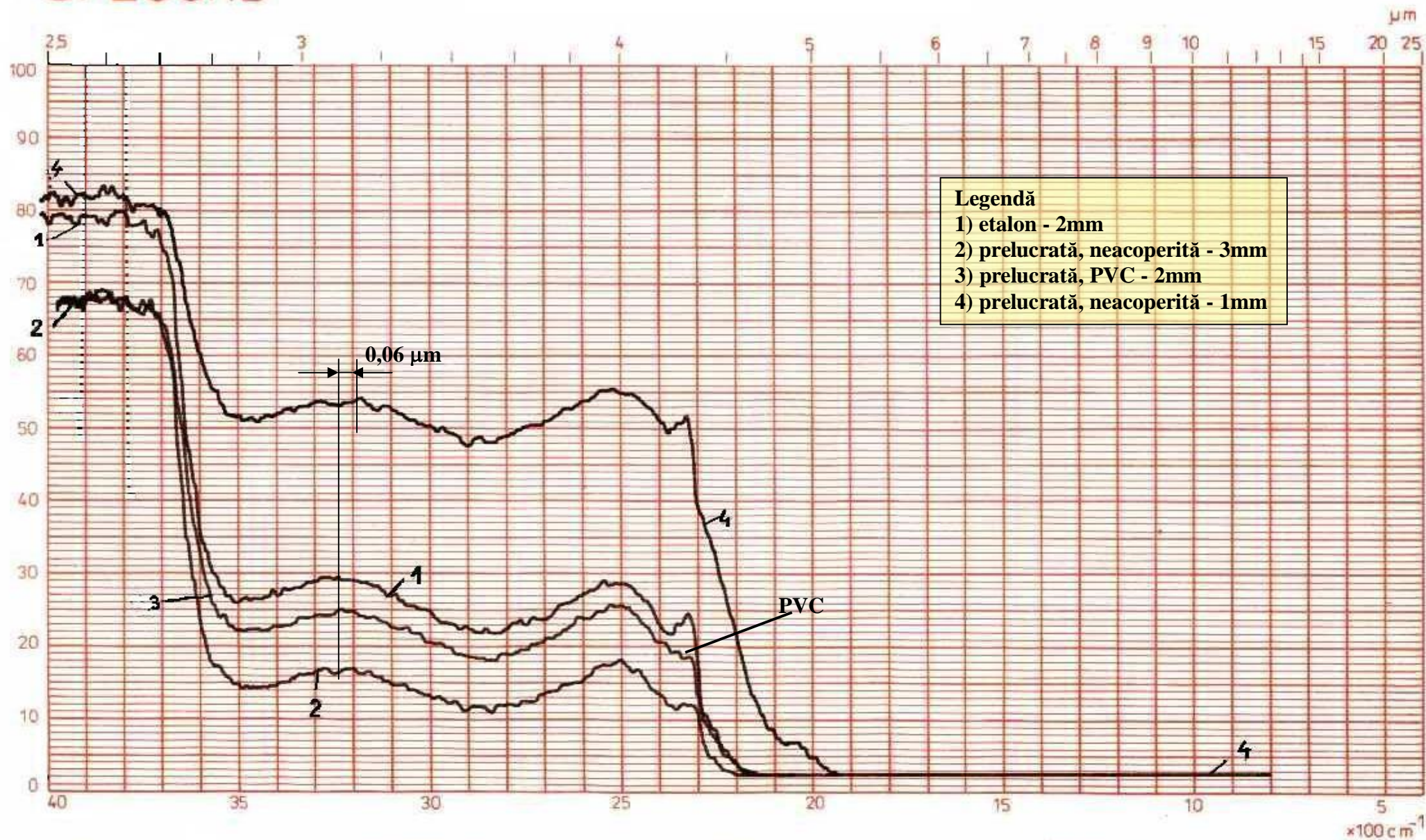
Probe
Nr.
Datum, Name

Konzentration.
Schichtdicke
Vergleichsprobe

Messbereich
Maßstab
Registrierzeit

SPECORD

ANEXA A2 TRANSMITANTA BK7 IN IR

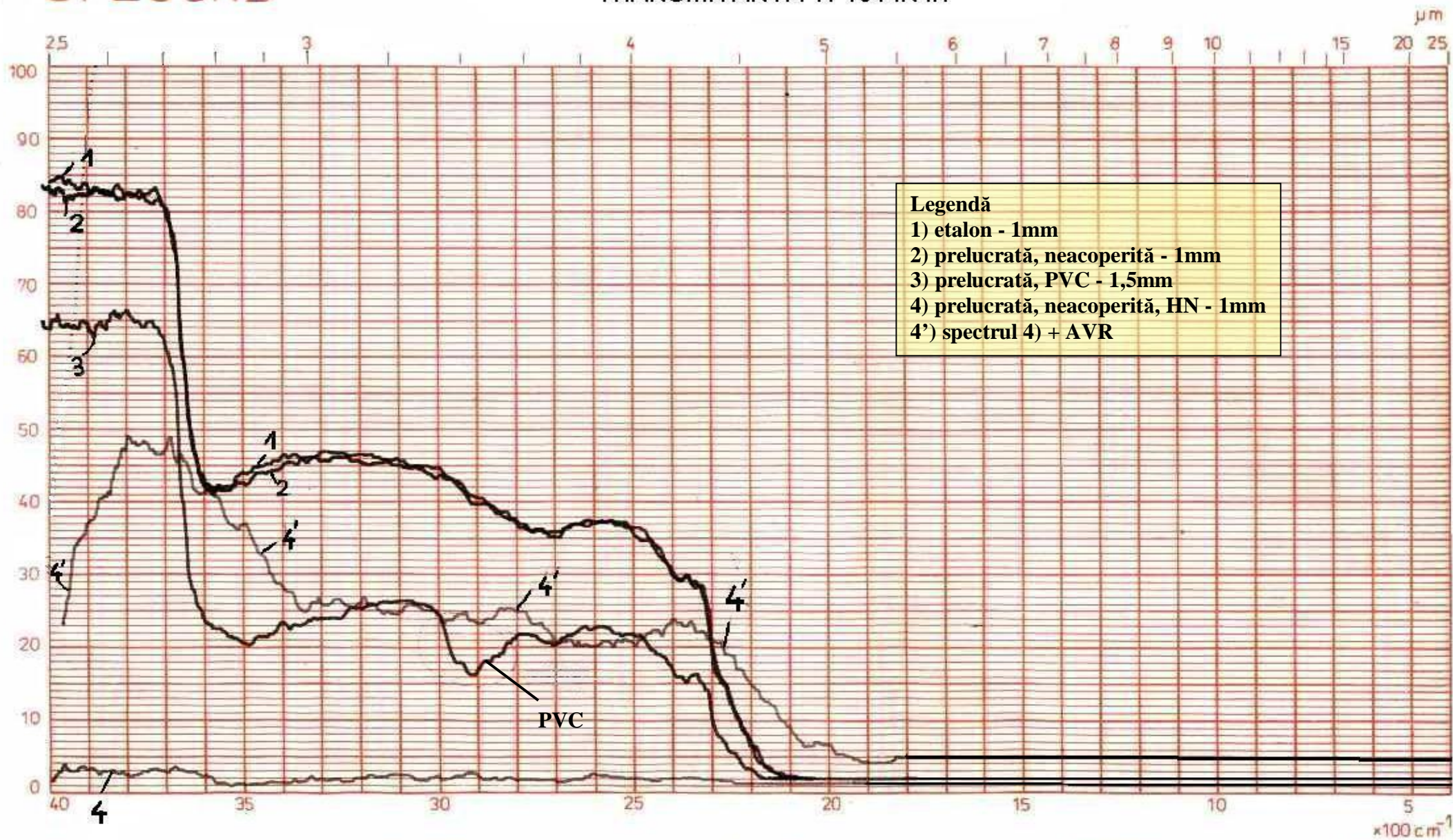


Legendă
1) etalon - 2mm
2) prelucrată, neacoperită - 3mm
3) prelucrată, PVC - 2mm
4) prelucrată, neacoperită - 1mm

Probe	Konzentration	Maßstab	Verstärkung	mit/ohne AVR
Nr.	Schichtdicke	Spalt	Zeitkonstante	
Datum, Name	Vergleichsprobe	Registrierzeit	Verzögerer	

SPECORD

ANEXA A3 TRANSMITANTA TF101 IN IR

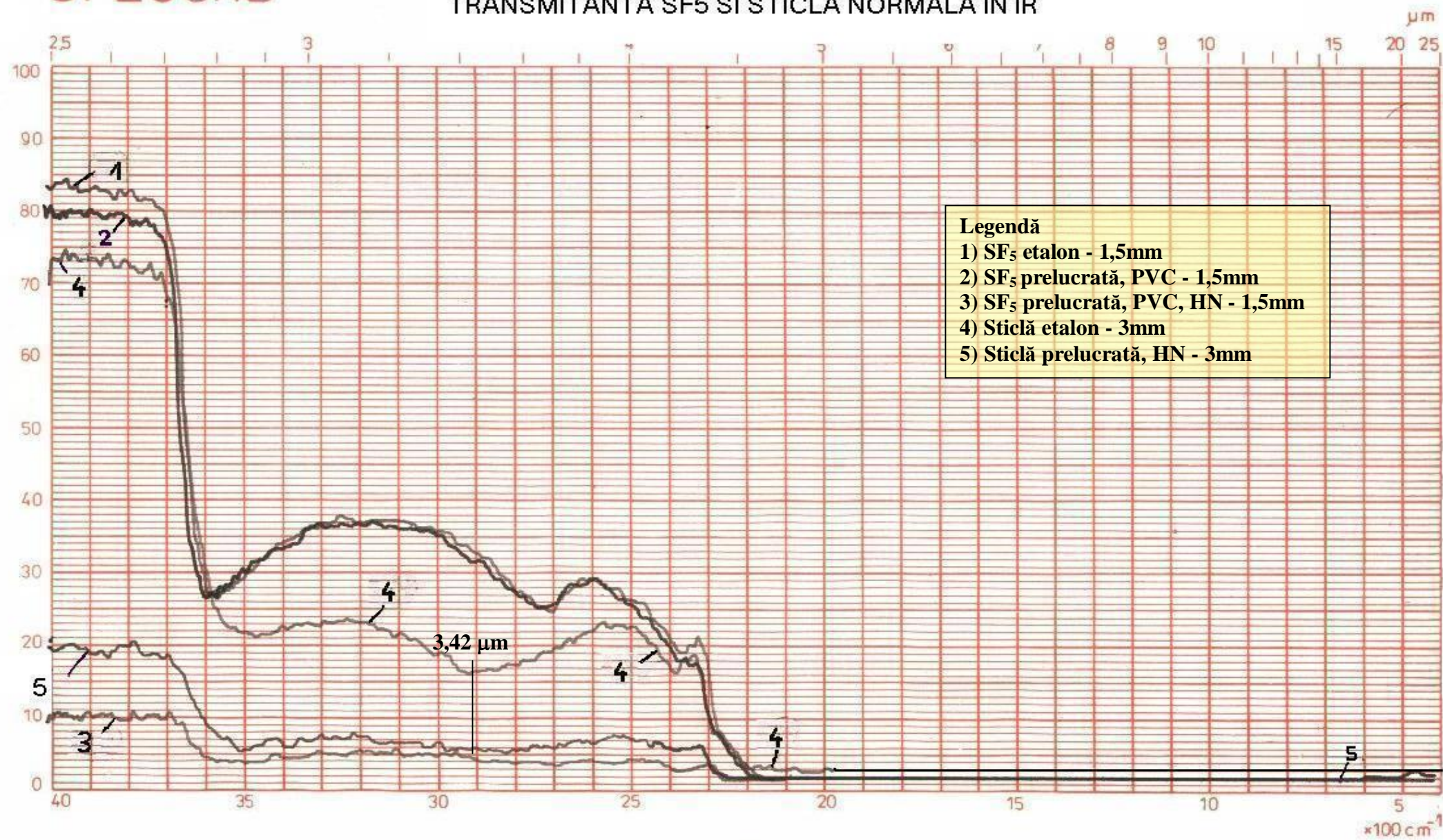


Legendă
 1) etalon - 1mm
 2) prelucrată, neacoperită - 1mm
 3) prelucrată, PVC - 1,5mm
 4) prelucrată, neacoperită, HN - 1mm
 4') spectrul 4) + AVR

Probe	Konzentration	Maßstab	Verstärkung	mit/ohne AVR
Nr.:	Schichtdicke	Spalt	Zeitkonstante	
Datum, Name	Vergleichsprobe	Registrierzeit	Verzögerer	

SPECORD

ANEXA A4 TRANSMITANTA SF5 SI STICLA NORMALA IN IR



Probe

Konzentration

Maßstab

Verstärkung

mit/ohne AVR

Nr.

Schichtdicke

Spalt

Zeitkonstante

Datum, Name

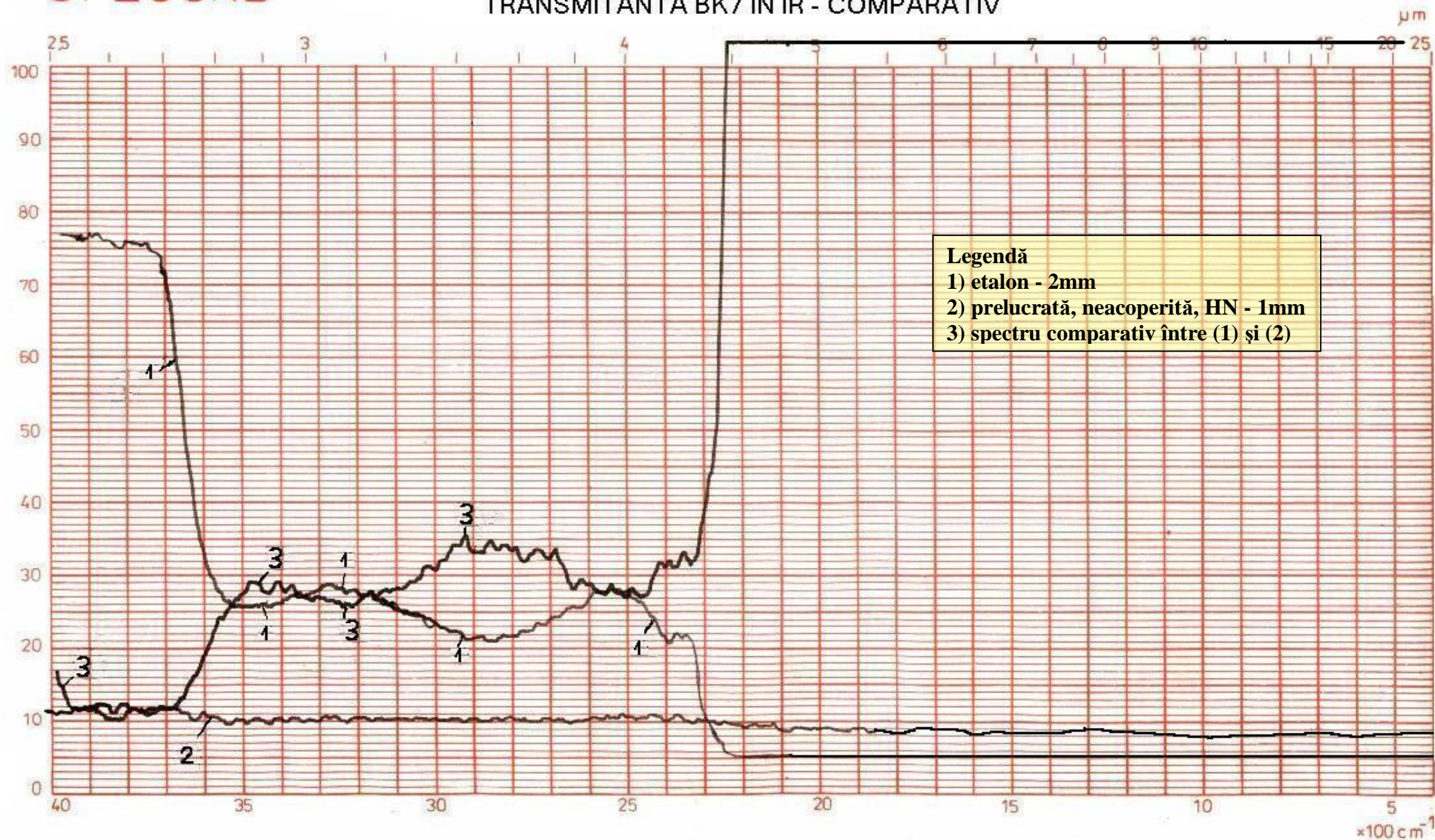
Vergleichsprobe

Registrierzeit

Verzögerer

SPECORD

ANEXA A5 TRANSMITANTA BK7 IN IR - COMPARATIV

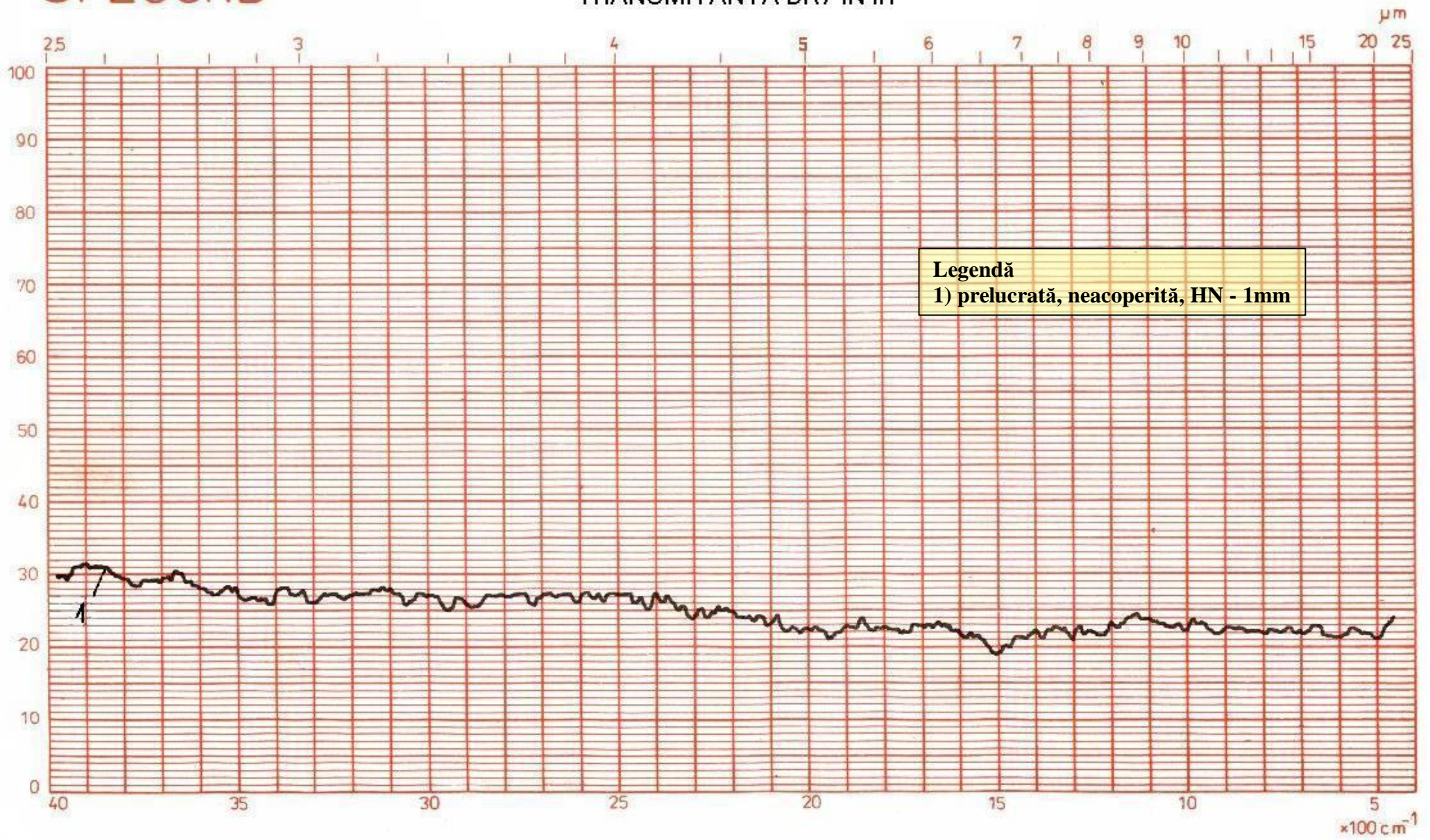


Legendă
1) etalon - 2mm
2) prelucrată, neacoperită, HN - 1mm
3) spectru comparativ între (1) și (2)

Probe	Konzentration	Maßstab	Verstärkung	mit/ohne AVR
Nr.	Schichtdicke	Spalt	Zeitkonstante	
Datum, Name	Vergleichsprobe	Registrierzeit	Verzögerer	

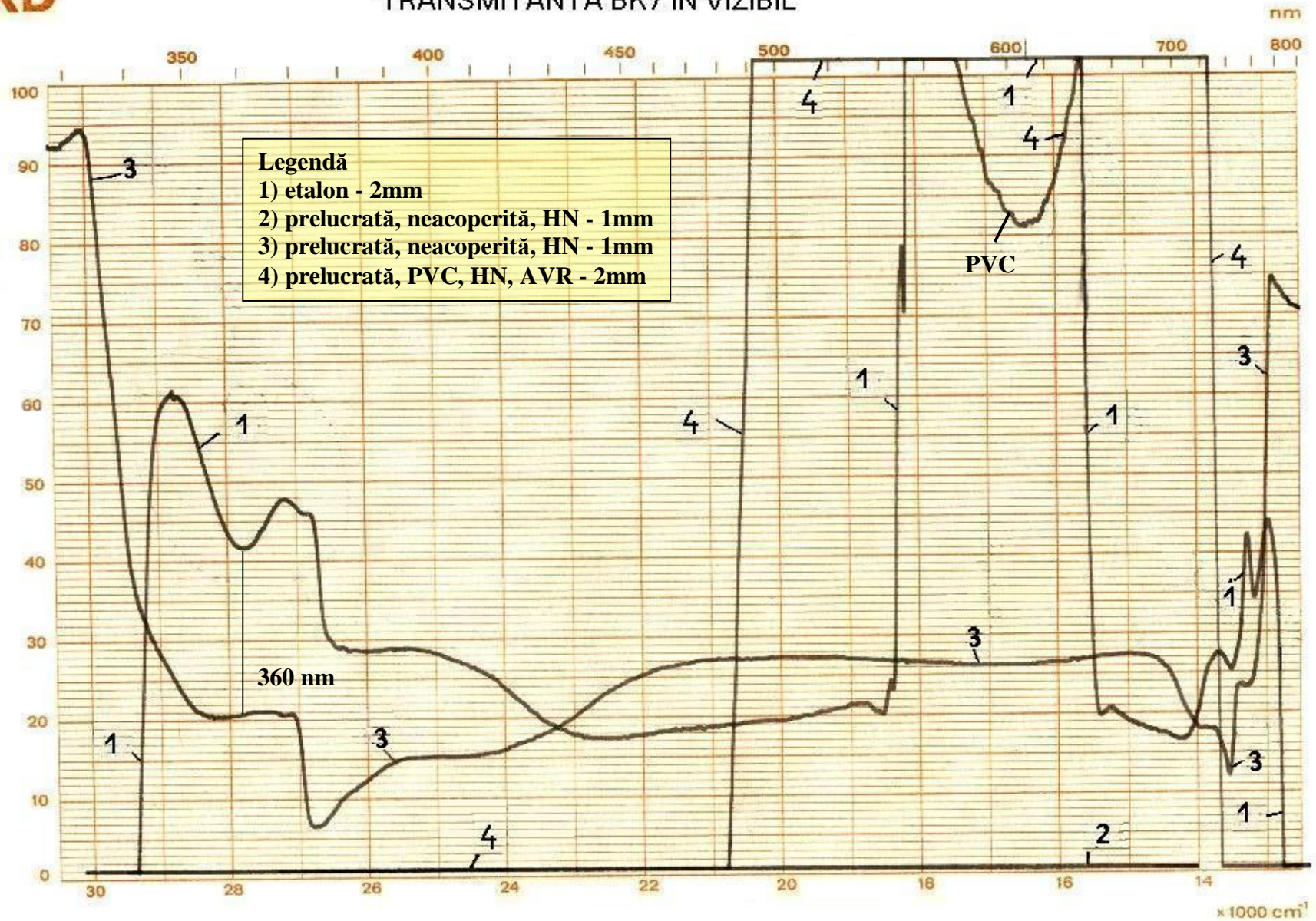
SPECORD

ANEXA A6 TRANSMITANTA BK7 IN IR



Legendă
1) prelucrată, neacoperită, HN - 1mm

Probe	Konzentration	Maßstab	Verstärkung	mit/ohne AVP
Nr.	Schichtdicke	Spalt	Zeitkonstante	
Datum, Name	Vergleichsprobe	Registrierzeit	Verzögerer	



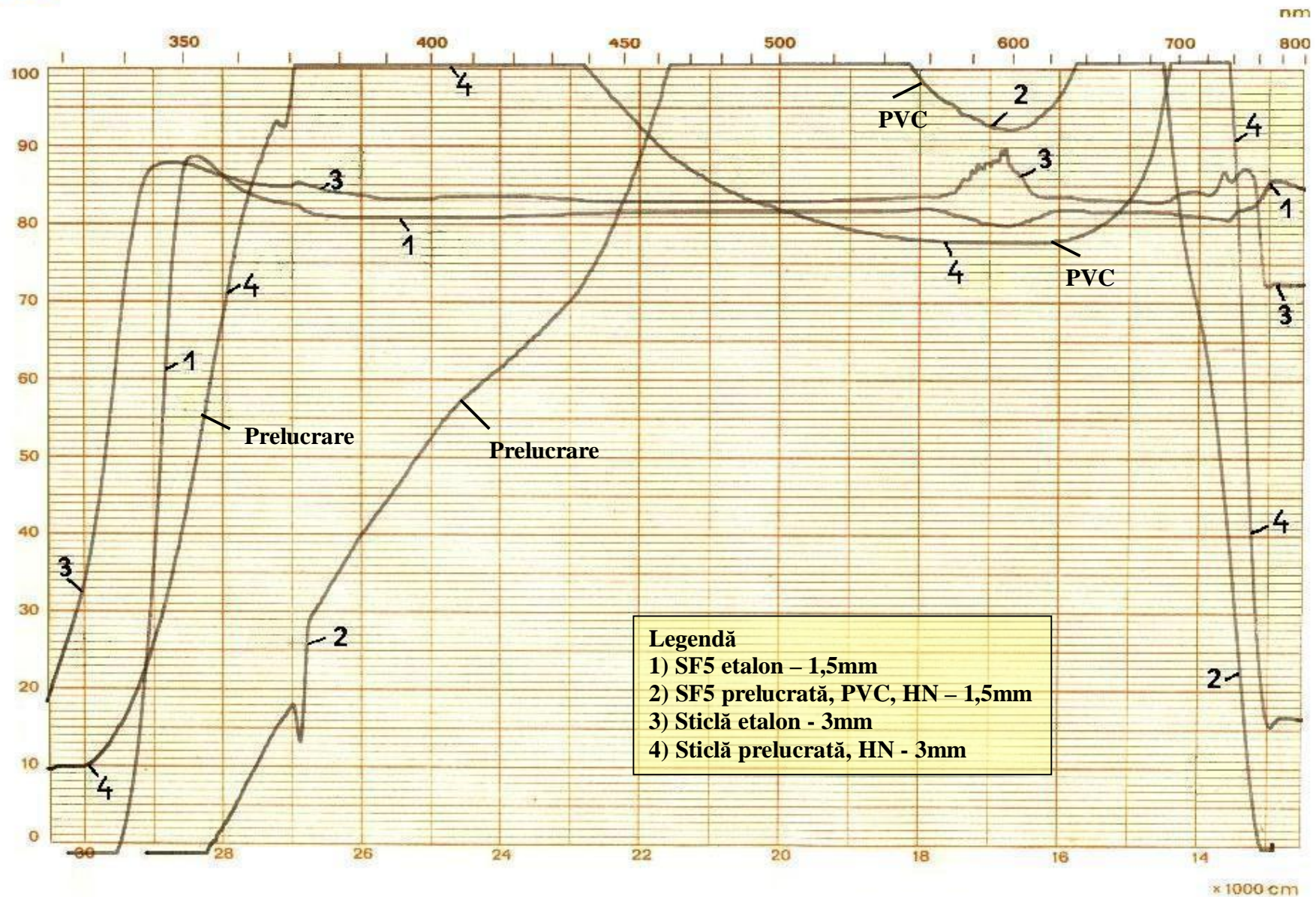
Probe
Nr.
Datum.Name

Konzentration
Schichtdicke
Vergleichsprobe

Meßbereich
Maßstab
Registrierzeit

ANEXA A8 TRANSMITANTA SF5 SI STICLA NORMALA IN VIZIBIL

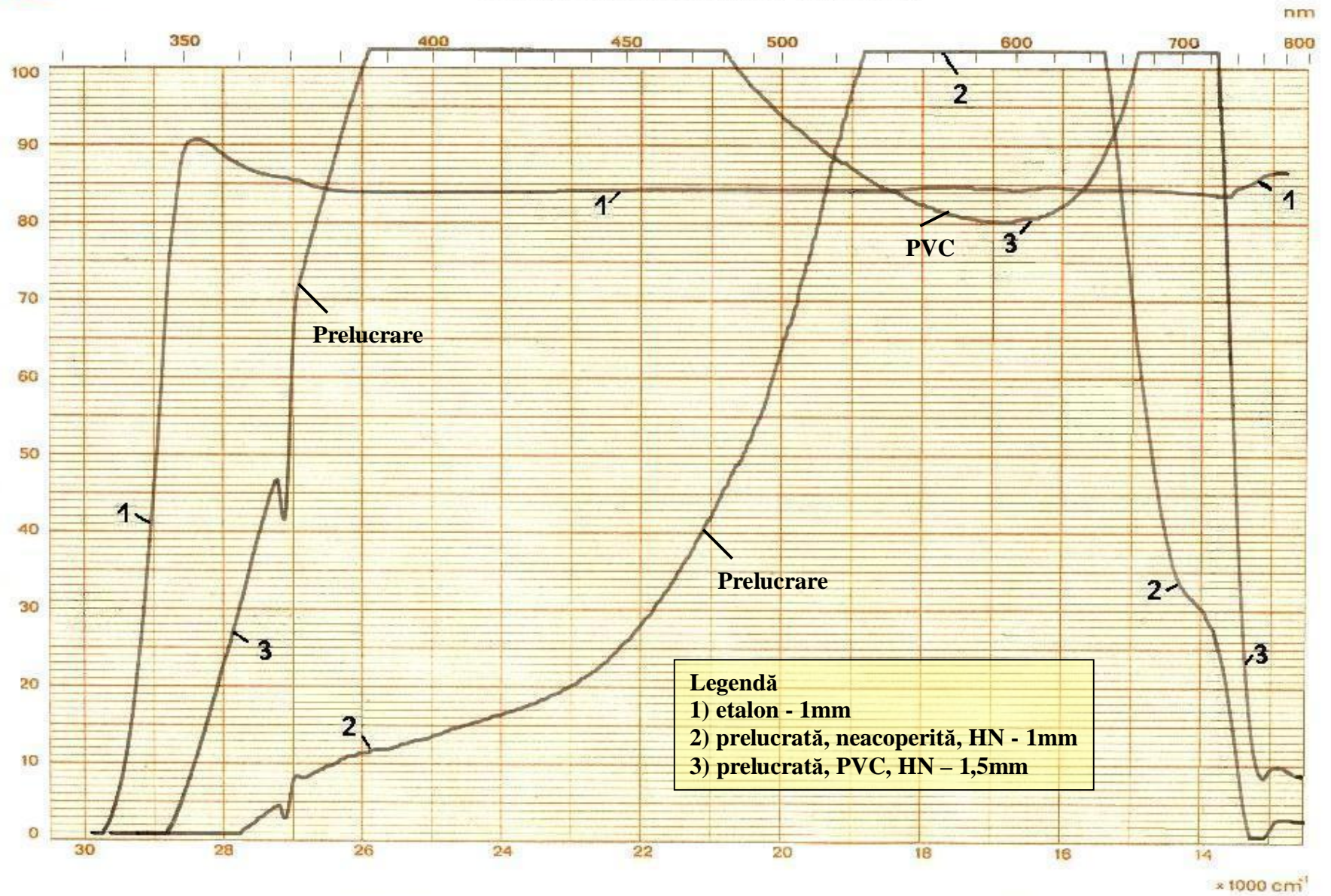
Stilnummer 32816-005 24



Probe
Nr.
Datum, Name

Konzentration
Schichtdicke
Vergleichsprobe

Meßbereich
Maßstab
Registrierzeit



Legendă
 1) etalon - 1mm
 2) prelucrată, neacoperită, HN - 1mm
 3) prelucrată, PVC, HN - 1,5mm

Probe
 Nr.
 Datum,Name

Konzentration
 Schichtdicke
 vergleichsprobe

Meßbereich
 Maßstab
 Registrierzeit