

**CONTRIBUȚII PRIVIND SINTEZA
OPTIMALĂ A SISTEMELOR OPTICE
ȘI A CARACTERISTICILOR DE
PROCES, SPECIFICE
PRELUCRĂRII CU LASER**

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Inginerie Mecanică
de către

ing. Ionescu Cosmin Laurențiu

Conducător științific: prof.univ.dr.ing Nicoară Ioan
Referenți științifici: prof.univ.dr.doc.ing. Breabăn Florin
gen.prof.univ.dr.ing. Crețu Emil
prof.univ.dr.ing. Popovici Vasile

Ziua susținerii tezei: 06.06.2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

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

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

Cuvânt înainte

În ultimii ani s-au dezvoltat noi ramuri ale tehnicii: microelectronica, mecanica fină, ingineria optică, industria aerospațială etc., fapt care a impus utilizarea, și în unele sectoare generalizarea, unor procedee noi de prelucrare - "neconvenționale" - cum sunt: prelucrarea cu laser, prelucrarea cu flux de electroni, prelucrarea cu flux de ioni, prelucrarea cu jet de plasma etc.

Prelucrările de acest tip permit obținerea unor precizii ridicate respectiv o bună calitate a suprafețelor realizate. De altfel, cererea crescândă pentru introducerea și utilizarea electrotehnologiilor în industria românească a condus la hotărârea de a se produce la noi în țară astfel de echipamente, cu care să fie dotate întreprinderile de profil.

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Mecatronică al Universității „Politehnica” din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Ioan Nicoară, de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara, sub a cărui îndrumare directă, atentă și permanentă s-au conturat direcțiile de cercetare, soluțiile de rezolvare a problemelor formulate și deschiderea posibilităților de efectuare a stagiului de cercetare din Franța.

Totodată, mulțumesc dlui prof.dr.doc.ing. Florin Breabăn, de la I.U.T. Bethune, Universite d'Artois, care mi-a facilitat accesul în laboratoarele C.A.L.F.A., pe care le conduce și m-a îndrumat în desfășurarea secvențială a experimentelor aferente fazei de execuție propriu-zise a roților dințate, pe instalația existentă în laborator.

Alese gânduri mă încearcă pentru dna conf.dr.ing. Corina Gruescu, care s-a implicat în mai multe faze tehnico-științifice ale lucrării, făcând posibilă încheierea cu succes a unei etape deosebit de importante din viața mea.

A doua fază a determinărilor experimentale, reprezentată de măsurarea rugozității unui lot mare de piese a fost posibilă prin bunăvoința dlui prof.dr.ing. Romeo Resiga, director la Centrul Național pentru Ingineria Sistemelor cu Fluide Complexe din cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara, căruia, de asemenea, îi adresez mulțumiri.

Timișoara, iunie, 2008

ing. Ionescu Cosmin Laurențiu

Ionescu, Cosmin Laurențiu

**CONTRIBUȚII PRIVIND SINTEZA OPTIMALĂ A
SISTEMELOR OPTICE ȘI A CARACTERISTICILOR DE
PROCES, SPECIFICE PRELUCRĂRII CU LASER**

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica,
2008, 211 pagini, 190 figuri, 42 tabele.

ISSN:uuuu-vvvv

ISBN (10):; ISBN (13):

Cuvinte cheie: laser, sistem optic, optimizare de proces, Taguchi

Rezumat:

Prezenta teză își propune să contribuie atât la optimizarea sistemelor optice asociate echipamentelor laser, cât și la optimizarea de proces, specifică unei aplicații concrete și larg răspândite a laserilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale și anume tăierea pe contur cu fascicul laser dirijat.

Sunt propuși algoritmi originali pentru stabilirea parametrilor de proces respectiv pentru sinteza optimală a expandorului și a obiectivului de focalizare, în condițiile în care este asigurată densitatea de putere admisă de materialele alese și o formă a causticii cu abatere controlată de la forma cilindrică.

Scopul tezei îl constituie optimizarea prelucrării cu fascicul laser a roților dințate din material plastic, experimentele realizate urmărind corelarea parametrilor fasciculului laser și stabilirea valorilor nominale optime ale acestora, astfel încât să poată fi controlate forma, dimensiunile și indicatorii de stare a suprafeței roților dințate.

Optimizarea parametrilor tehnologici are la baza proiectarea robustă Taguchi, respectiv minimizarea impactului factorilor paraziți (zgomot), prin determinarea unei combinații adecvate a acestora, astfel încât procesului sau produsului să i se asigure performanțele impuse și, totodată robustețe în raport cu factorii – zgomot. Este teoretizat raportul semnal/zgomot ca indicator de performanță. De asemenea sunt descrise explicit planurile de experiențe Taguchi, care urmează să fie aplicate în optimizarea parametrilor de proces ai tăierii roților dințate cu fascicul laser.

CUPRINS

Cuprins	5
1. Introducere. Actualitatea și obiectivele tezei	7
2. Laseri. Caracteristici. Aplicații curente și perspective	11
2.1 Scurt istoric	11
2.2 Principiul emisieii laser	12
2.3 Proprietățile fundamentale ale radiației laser	15
2.3.1 Coerența	16
2.3.2 Directivitatea	17
2.3.3 Monocromaticitatea	19
2.3.4 Intensitatea radiației	22
2.4 Tipuri de laseri	22
2.4.1 Laseri cu mediu activ solid	22
2.4.2 Laseri cu mediu activ lichid	27
2.4.3 Laseri cu mediu activ gazos	30
2.4.3.1 Laseri atomici	31
2.4.3.2 Laseri ionici	32
2.4.3.3 Laseri moleculari	34
2.5 Concluzii. Contribuții personale	37
3. Interacțiunea fasciculului laser cu materia	39
3.1 Încălzirea materialelor	39
3.1.1 Absorbivitatea	39
3.1.2 Transferul de căldură	44
3.1.3 Considerarea pierderilor radiative	49
3.2 Topirea superficială	50
3.3 Vaporizarea	52
3.4 Concluzii. Contribuții personale	56
4. Particularități ale prelucrărilor mecanice bazate pe tehnologii laser	58
4.1 Influența aberațiilor asupra geometriei fasciculului emergent respectiv asupra distribuției energetice	58
4.1.1 Considerații privind aberațiile sistemelor optice	58
4.1.2 Impactul aberațiilor asupra focalizării fasciculului laser	59
4.1.3 Distribuția intensității în fasciculul laser	60
4.1.4 Particularități ale interacțiunii fasciculului laser cu sisteme optice lenticulare	62
4.1.5 Sistem optic de expandare a fasciculului laser	63
4.2 Particularități ale prelucrării laser pe echipamente cu comandă - program	65
4.3 Elemente privind precizia de prelucrare cu tehnologii laser	69
4.4 Concluzii. Contribuții personale	70
5. Sinteza optimală a unui sistem optic asociat unui laser cu CO ₂ , de putere medie, destinat prelucrărilor mecanice	72
5.1 Sisteme optice asociate echipamentelor laser pentru prelucrări mecanice precise	72
5.2 Algoritmi de calcul de gabarit al expanderului și obiectivului de focalizare. Sinteza componentelor optice lenticulare pentru echipamente laser	77

5.3	Materiale specifice componentelor optice utilizate pentru laseri cu CO ₂ care emit pe lungimea de undă de 10.6 μm	85
5.4	Proiectarea optimală a sistemului optic asociat echipamentului de prelucrare laser cu CO ₂ , prin soft dedicat	93
5.4.1	Formularea cerințelor aplicației și predimensionarea sistemului	93
5.4.2	Soft dedicat calculului de gabarit și sintezei componentelor sistemului optic.....	94
5.4.3	Analiza calității sistemului optic proiectat	101
5.5	Concluzii. Contribuții personale	122
6.	Program experimental de optimizare a procesului de prelucrare cu fascicul laser	125
6.1	Scopul și etapele de desfășurare a programului	125
6.2	Instalația experimentală	127
6.3	Proiectarea CAD a roților dințate și generarea codului NC	128
6.4	Optimizarea parametrilor de proces.....	133
6.4.1	Abordarea metodei de proiectare robustă Taguchi	133
6.4.2	Planuri de experiențe	138
6.4.3	Matrici de experiențe fracționate ortogonale Taguchi standard	140
6.4.4	Determinări experimentale privind calitatea suprafețelor prelucrate	142
6.4.5	Planuri de experiențe clasice	163
6.4.6	Planuri de experiențe Taguchi	166
6.4.7	Planuri de experiențe Taguchi cu valoare țintă (Qualitek)	171
6.5	Concluzii. Contribuții personale	183
7.	Concluzii finale. Contribuții personale	186
	Anexe	189
	Bibliografie	207

1. INTRODUCERE. ACTUALITATEA ȘI OBIECTIVELE TEZEI

În ultimele decenii s-au dezvoltat noi ramuri ale tehnicii ca: microelectronica, mecanica fină, ingineria optică, industria aerospațială etc., fapt care a impus utilizarea, și în unele sectoare generalizarea, unor procedee noi de prelucrare - "neconvenționale" - cum sunt: prelucrarea cu laser, prelucrarea cu flux de electroni, prelucrarea cu flux de ioni, prelucrarea cu jet de plasma etc.

Extinderea utilizării procedeelelor enumerate mai sus este urmarea firească a faptului că acestea fac posibilă prelucrarea în condiții de eficiență tehnico-economică ridicată a unor materiale cu proprietăți speciale cum sunt: oțelurile greu prelucrabile prin așchiere, carburile metalice, diamantele naturale și sintetice, materialele mineraloceramice, metalele pure etc.

În țările puternic dezvoltate industrial prelucrarea cu fascicule dirijate a cunoscut o extindere rapidă în condițiile în care criza energetică a impus și în domeniul industriei constructoare de mașini noi procese tehnologice cu eficiență tehnică sporită. Unul dintre cele mai noi procedee utilizate în industria constructoare de mașini este cel bazat pe utilizarea LASER („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”).

Prelucrările de acest tip permit obținerea unor precizii ridicate respectiv o bună calitate a suprafețelor realizate. Deosebit de eficiente se dovedesc prelucrările cu fascicule dirijate în ramurile de vârf ale tehnicii: mecanică fină, microelectronica, construcția navelor cosmice, tehnica nucleară etc. De altfel, cererea crescândă pentru introducerea și utilizarea electrotehnologiilor în industria românească a condus la hotărârea de a se produce la noi în țară astfel de echipamente, cu care să fie dotate întreprinderile de profil.

Totodată, se remarcă tendința mereu crescătoare de realizare a unor instalații cu grad înalt de tehnicitate prevăzute cu comandă program și comandă adaptivă. Tehnologiile de prelucrare cu fascicule dirijate, în prezent, sunt asociate mașinilor cu comandă numerică.

Extinderea tot mai largă a gamei de utilizări a fasciculelor dirijate în domeniul prelucrărilor se datorează posibilității de focalizare în spoturi de dimensiuni extrem de mici a unor densități foarte mari de putere, în comparație cu alte surse convenționale cum sunt: flacăra oxiacetilenică sau arcul electric.

Aplicațiile optice non - imaging, de tipul sistemelor optice asociate echipamentelor care exploatează laserii, se află în continuă dezvoltare. Aceasta vizează optimizarea sistemelor optice în scopul creșterii posibilităților de adaptare a fasciculului laser la diverse aplicații specifice, tot mai numeroase. Eforturile cercetării în domeniu se îndreaptă spre elaborarea algoritmilor de proiectare a unor sisteme flexibile și precise privind transformarea parametrilor energetici și geometrici ai fasciculului radiant, în concordanță cu cerințele concrete ale echipamentului. Calitatea sistemului optic influențează direct performanțele de ansamblu ale aplicației indiferent de domeniul de lucru al acesteia (prelucrări mecanice neconvenționale, măsurări de tipul telemetriei, tratamente medicale specifice, tehnica stocării și citirii informației, transmiterea informației etc.).

Totodată, o importanță deosebită prezintă și parametrii de proces – de natură optică, electrică și mecanică – a căror corelație face obiectul unei optimizări distincte, indispensabile obținerii unor echipamente și instalații performante, eficiente și fiabile.

Prezenta teză își propune să contribuie atât la optimizarea sistemelor optice asociate echipamentelor laser, cât și la optimizarea de proces, specifică unei aplicații concrete și larg răspândite a laserilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale și anume tăierea pe contur cu fascicul laser dirijat.

Scopul tezei îl constituie optimizarea prelucrării cu fascicul laser a roților dințate din material plastic, experimentele realizate urmărind corelarea parametrilor fasciculului laser și stabilirea valorilor nominale optime ale acestora, astfel încât să poată fi controlate forma, dimensiunile și indicatorii de stare a suprafeței roților, iar eficiența economică a prelucrării să fie maximă.

Pe baza observațiilor asupra caracteristicilor energetice și geometrice ale fasciculului radiant la suprafața piesei, precum și asupra interdependenței factorilor de proces, s-au identificat aspecte cu potențial de îmbunătățire, perfecționare și optimizare, care au condus la formularea următoarelor obiective ale tezei:

- determinarea parametrilor de influență a formei și mărimii petei de difuzie, respectiv a distribuției energetice pe suprafața acesteia, asupra preciziei și vitezei de tăiere a unui echipament de prelucrare cu fascicul laser
- optimizarea sistemului optic asociat unui echipament care utilizează un fascicul laser cu lungimea de undă de 10.6 μm , respectiv elaborarea unor algoritmi de proiectare a subansamblurilor expandor și obiectiv de focalizare
- identificarea parametrilor care influențează precizia de prelucrare, respectiv indicatorii de calitate ai suprafeței pieselor prelucrate
- proiectarea și desfășurarea unui program experimental de optimizare a procesului de prelucrare în scopul obținerii valorilor optime ale celor mai importanți factori de influență (putere, durată a impulsului, durată a repausului, viteză de deplasare a capului de tăiere, defocusare și debit de gaz), având drept criteriu țintă un parametru de stare a suprafeței unor roți dințate prelucrate prin tăiere cu laser
- determinări experimentale, necesare derulării programului experimental, constând în prelucrarea roților dințate din policarbonat, utilizând diverse combinații ale parametrilor de influență asupra procesului, în scopul aplicării metodei de proiectare robuste Taguchi și, respectiv, optimizării procesului de tăiere

Teza este structurată pe șapte capitole.

Capitolul al doilea, *Laseri. Caracteristici. Aplicații curente și perspective*, reprezintă o incursiune științifică, având un caracter preponderent fundamental. Este prezentat, pe scurt, principiul emisiei laser, apoi sunt descrise proprietățile fundamentale ale radiației laser, cu referire la coerență, directivitate, monocromaticitate și intensitate a fasciculului radiant. Ultima parte a capitolului prezintă principiile de funcționare ale laserilor existenți în prezent (laseri cu mediu activ solid, cu mediu activ lichid, cu mediu activ gazos, laseri atomici, ionici și moleculari).

Capitolul al treilea, *Interacțiunea fasciculului laser cu materia*, tratează selectiv, aspectele de interes în procedeul neconvențional de tăiere cu laser. Sunt descrise mecanismele încălzirii, topirii și vaporizării locale a structurilor materiale, respectiv efectele asupra zonelor învecinate punctelor de interacțiune directă cu un fascicul radiant cu densitate de putere ridicată.

Capitolul al patrulea, *Particularități ale prelucrărilor mecanice bazate pe tehnologii laser*, debutează prin relevarea aspectelor specifice interacțiunii radiației laser cu materialele optice din care sunt prelucrate elementele sistemului optic de transmitere și focalizare a fasciculului. Este evidențiată principala aberație și anume cea de deschidere, care influențează forma spațială a segmentului activ al fasciculului.

Paragrafele următoare definesc și discută pe larg sistemele flexibile de fabricație, care prin intermediul CAD/CAM permit prelucrări automate eficiente și precise. Se fac referiri la programul Laser DX3 utilizat pentru generarea programelor NC, compatibile cu echipamentul pe care s-a desfășurat o secvență a determinărilor experimentale, respectiv debitarea roților dințate din material plastic. Sunt prezentate modulul de proiectare constructivă a reperului (asimilabil unei extensii a programului AutoCAD), modulul de proiectare a tehnologiei de fabricație pe mașina unealtă cu comandă numerică (care generează programul de prelucrare CNC a piesei, pe baza unui fișier *.txt) și modulul de transfer (care asigură transferul programului de prelucrare CNC pe calculatorul atașat mașinii – unelte). Ultima parte a capitolului pune în evidență factorii multipli de influență a preciziei de prelucrare cu fascicul laser, atât la nivel macro, cât și microgeometric. Sunt comentate influențele caracteristicilor geometrice (poziționarea piesei), optice (calitatea și gradul de uzare al materialelor optice, parametrii non-imaging ai expandorului și obiectivului, defocusarea), de uzare a părților mecanice din construcția laserului (oglinzilor, bastonului de mediu activ), de manifestare a unor fluctuații aleatoare, temporare sau permanente în procesul de generare a fasciculului etc., asupra preciziei geometrice și a stării suprafeței pieselor prelucrate.

Capitolul al cincilea, *Sinteza optimală a unui sistem optic asociat unui laser cu CO₂ de putere medie destinat prelucrărilor mecanice*, se ocupă, în detaliu, de proiectarea și optimizarea sistemului optic compus din subansamblurile expandor și obiectiv de focalizare. Sunt propuși algoritmi originali, rezultați prin prelucrarea și extensia referirilor din literatura de specialitate, pentru proiectarea optimală a expandorului și obiectivului de focalizare, în condițiile în care este asigurată densitatea de putere admisă de materialele alese și o formă a causticii cu abatere controlată de la forma cilindrică. Este prezentată o aplicație software originală, scrisă în Visual Basic, prin rularea căreia s-au obținut toate elementele de geometrie și caracteristicile energetice ale unui sistem optic complet. Parametrii non-imaging ai sistemului, care oferă două soluții pentru obiectivul de focalizare, sunt analizați cu ajutorul programului OSLO LT.

Capitolul al șaselea, *Program experimental de optimizare a procesului de prelucrare cu fascicul laser*, este dedicat descrierii desfășurării proiectării, execuției și măsurării pieselor – epruvetă, aplicării metodei Taguchi pentru procesul de tăiere a pieselor în scopul determinării parametrilor optimi ai procesului și verificării acestora prin implementare în realizarea unui set de piese cu scop de validare.

Optimizarea parametrilor tehnologici prin proiectarea robustă Taguchi, expune bazele teoretice ale metodei Taguchi, respectiv minimizarea impactului factorilor paraziți (zgomot) prin determinarea unei combinații optime a acestora, astfel încât procesului sau produsului să i se asigure performanțele impuse și, totodată robustețea în raport cu factorii – zgomot. Este teoretizat raportul semnal/zgomot ca indicator de performanță. Sunt descrise amănunțit și explicitate planurile de experiențe Taguchi, care urmează să fie aplicate în optimizarea parametrilor de proces ai tăierii roților dințate cu fascicul laser. Este exprimată opțiunea pentru planurile Taguchi factoriale fracționate.

Piese executate practic au constat dintr-un lot de roți dințate, care constituie componentele unui reductor în două trepte. Procesul de tăiere s-a realizat în Laboratorul C.A.L.F.A. de la I.U.T. Bethune, Université d'Artois, Franța, cu ajutorul unei mașini cu fascicul laser ($10.6 \mu\text{m}$), pentru care s-au impus opt combinații ale valorilor unor parametri semnificativi (puterea, durata impulsului, durata repausului, viteza de deplasare a capului de tăiere, defocusarea și debitul de gaz). Pentru fiecare combinație s-au executat cinci roți dințate – epruvetă (experimente). Caracteristica țintă urmărită a fost starea suprafeței, descrisă prin parametrul sintetic R_a . Măsurările complete privind starea suprafeței s-au desfășurat în Laboratoarele U.P.Timișoara, pe o instalație Mahr. Valorile parametrilor de influență, precum și rezultatele experimentale obținute prin măsurări au fost introduse în programul Qualitek, care execută algoritmi matematici statuați de metoda Taguchi. S-a urmărit obținerea unui model matematic liniar, adecvat procesului, care să permită înaintarea către zona optimului. În acest scop, pe baza datelor experimentale s-a realizat un program factorial complet de tip 2^7 , pentru funcțiile de răspuns.

Metoda experimentului factorial inclusă în clasa planificării experiențelor (experimental design) este o aplicație directă a analizei dispersionale (ANOVA) și permite determinarea cantitativă a influenței factorilor, precum și evaluarea erorilor experimentale și a interacțiunii factorilor. Pentru a scoate în evidență influența diferiților factori, se utilizează mediile aritmetice, calculate pe baza rezultatelor coresponzătoare ale aceluiași valori ale factorului de interes.

În urma determinării unui interval de variație și a unui centru al experimentului, s-au considerat suficiente două niveluri pentru fiecare factor, niveluri care au fost selectate din mulțimea tuturor celor disponibile.

Combinația optimă de parametri pentru obținerea valorii țintă $R_a = 0,8$ a fost utilizată pentru prelucrarea unui nou lot de roți, cu ajutorul cărora s-a derulat un experiment de confirmare, care să valideze corectitudinea optimizării.

Ultimul capitol al lucrării prezintă concluziile finale și sintetizează cele mai importante contribuții originale din teză.

Finalizarea tezei de doctorat, care a necesitat integrarea unor cunoștințe aprofundate transdisciplinare și o bază materială modernă și performantă, a fost posibilă numai cu sprijinul unor personalități științifice, față de care, doresc să îmi exprim gratitudinea.

Alese mulțumiri adresez, în primul rând, conducătorului științific, dlui prof.dr.ing. Ioan Nicoară, de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara, sub a cărui îndrumare directă, atentă și permanentă s-au conturat direcțiile de cercetare, soluțiile de rezolvare a problemelor formulate și deschiderea posibilităților de efectuare a stagiului de cercetare din Franța.

Totodată, mulțumesc dlui prof.dr.doc.ing. Florin Breabăn, de la I.U.T. Bethune, Université d'Artois, care mi-a facilitat accesul în laboratoarele C.A.L.F.A., pe care le conduce și m-a îndrumat în desfășurarea secvenței de determinări experimentale aferente fazei de execuție propriu – zisă a roților dințate, pe instalația existentă în laborator.

Alese gânduri mă încercă pentru dna conf.dr.ing. Corina Gruescu, care s-a implicat în mai multe faze tehnico-științifice ale lucrării, făcând posibilă încheierea cu succes a unei etape deosebit de importante din viața mea.

A doua fază a determinărilor experimentale, reprezentată de măsurarea rugozității unui lot mare de piese a fost posibilă prin bunăvoința dlui prof.dr.ing. Romeo Resiga, director la Centrul Național pentru Ingineria Sistemelor de Fluide Complexe din cadrul U.P. Timișoara, căruia, de asemenea, îi adresez mulțumiri.

2. LASERI. CARACTERISTICI. APLICAȚII CURENTE ȘI PERSPECTIVE

2.1 Scurt istoric

Laserii au apărut pe o anumită treaptă a cunoașterii umane, când înțelegerea fenomenelor legate de natura luminii a permis utilizarea procesului de emisie stimulată în amplificarea radiațiilor electromagnetice.

Existența emisiei stimulate a fost demonstrată de Einstein încă din anul 1917, dar a trecut neobservată posibilitatea utilizării ei în amplificarea radiațiilor electromagnetice până în perioada 1951 – 1952, când Townes, Gordon și Zeiger (SUA), în același timp cu Basov și Prohorov (URSS), au putut exprima principiile fundamentale și tehnice, care stau la baza emisiei stimulate, stabilind pentru prima dată modalitățile experimentale capabile să o evidențieze.

Se pot aminti, asociate aceleiași perioade, și cercetările lui Kastler cu privire la pompajul optic, fără care nici un laser cu mediul activ solid nu funcționează.

Shawlow și Townes sunt cei care prevăd posibilitatea acțiunii laserului în domeniile infraroșu, respectiv vizibil. În scurt timp cercetările aplicative au fost predilect orientate spre crearea unor echipamente care să funcționeze pe baza emisiei stimulate de radiație.

Astfel, la 7 iulie 1960, Maiman obține generarea prin emisie stimulată a radiației roșii din spectrul vizibil, folosind ca mediu activ un cristal de rubin iluminat de o lampă flash și o cavitate rezonantă de tip Fabry – Perot.

La numai doi ani de la această realizare, Nelson și Boyle de la Bell Telephone Laboratories raportau funcționarea în undă continuă a unui laser cu rubin răcit cu azot lichid.

Primul laser cu funcționare în undă continuă a fost realizat în februarie 1961 de Javan, Benett și Herriott folosind ca mediu activ un amestec gazos format din heliu și neon.

Posibilitatea utilizării unor amestecuri de gaze ca medii active se bazează pe o observație spectroscopică, datată din anul 1930, potrivit căreia distribuția de populații dintr-o descărcare în gaz se abate de la distribuția Boltzman, dacă se adaugă un alt gaz care permite schimburi rezonante de energie prin intermediul proceselor colizionale dintre atomii amestecului.

Laserul cu He-Ne a fost realizat pentru prima dată în România în anul 1962 de către un grup de cercetători de la Institutul de Fizică Atomică București, condus de profesorul Agârbiceanu.

Sursele laser, prin proprietățile lor excepționale și fiabilitatea ridicată, sunt astăzi pregătite pentru a fi integrate în echipamente utilizate într-o plajă extinsă din aproape toate sectoarele de activitate.

Cea mai recentă descoperire în materie de laser a fost anunțată la 21 februarie 2005. Firma Intel a inventat un laser pe bază de silicon, menit să facă mai ieftină și mai facilă comunicarea optică. Compania a creat un cip care conține opt lasere continue Raman care utilizează procesele silicon standard în locul unor materiale și tehnologii scumpe, prevăzute în prezent pentru crearea laserilor. Tipul de amplificare, denumit efectul Raman, a fost de 10,000 de ori mai puternic în

silicon decât în fibra de sticlă. Laserele emit o undă de lumină continuă, care poate fi modulată într-o undă de impulsuri, care permite codificarea informațiilor.

2.2 Principiul emisie laser

În concordanță cu legile mecanicii cuantice, energia electronilor legați de atom ca și energia atomilor și a moleculelor este cuantificată. Această energie poate avea numai valori bine determinate, (notate cu $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n$), care definesc stări energetice sau niveluri energetice specifice particulei.

Nivelul cel mai sărac în energie, E_0 , se numește nivel fundamental. Această stare energetică a particulelor este cea mai stabilă.

Particula (electron, atom) poate exista un timp limitat în stări energetice care nu sunt minimale (pe niveluri energetice superioare).

Numărul de particule din unitatea de volum care au energia corespunzătoare unui nivel energetic definește populație (N) a nivelului respectiv.

Distribuția particulelor funcție de energia lor este dată de legea lui Boltzmann:

$$\frac{N_n}{N_m} = \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT}\right), \quad (2.1)$$

unde E_n , respectiv E_m sunt nivelurile energetice caracterizate prin $E_n > E_m$ (fig.2.1)

N_n , respectiv N_m - populațiile nivelurilor energetice corespunzătoare

k - constanta lui Boltzmann

T - temperatura absolută.

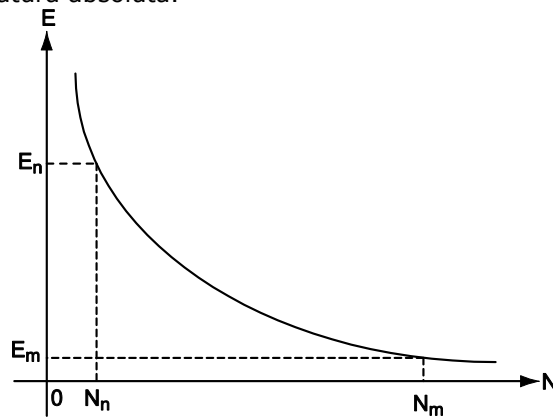


Fig. 2.1 Nivelurile energetice și populațiile corespunzătoare

În anumite situații există g_i stări staționare diferite care au aceeași energie E_i . Aceste stări sau niveluri se numesc stări degenerate, iar g_i reprezintă gradul de degenerescență (ponderea statistică), căruia îi este caracteristică relația:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{g_n}{g_m} \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT}\right). \quad (2.2)$$

Popularea diferitelor niveluri energetice depinde de existența echilibrului termodinamic între sistemul considerat și sistemele înconjurătoare. În condiții de echilibru termodinamic, caracterizat prin temperatura T , populația unui nivel energetic N_i este dată de legea lui Boltzmann în forma:

$$N_i = g_i N_0 A e^{-\frac{E_i}{kT}}, \quad (2.3)$$

unde N_i este populația nivelului considerat

N_0 – numărul total de particule

A – constanta lui Einstein

g_i – ponderea statistică.

Nivelul fundamental este populat la o temperatura suficient de joasă iar popularea celorlalte niveluri are loc odată cu creșterea temperaturii, fenomen asociat cu absorbția, respectiv cu emisia de radiație. Cu cât temperatura este mai mare, cu atât sunt mai intense aceste fenomene.

Dacă substanța nu este în stare de echilibru termodinamic, popularea nivelurilor energetice depinde de condițiile de excitare. În cazul unei excitări puternice se poate observa o emisie intensă chiar la temperaturi scăzute.

Dacă asupra unui sistem acționează o radiație electromagnetică, între nivelurile energetice au loc tranziții cuantice. Tranziția particulelor de la un nivel energetic la altul se poate realiza prin:

- absorbție
- emisie spontană
- emisie stimulată.

Tranzițiile cuantice pot fi radiative sau neradiative.

Tranziția este radiativă sau optică dacă la trecerea de pe un nivel energetic pe altul se emite sau se absoarbe energie sub forma unei radiații electromagnetice.

Tranziția în urma căreia nu are loc un schimb direct de energie între sistemul considerat și sistemul înconjurător este tranziția neradiativă.

Cel de-al doilea postulat al lui Bohr arată că la trecerea dintr-o stare energetică în alta se emite sau se absoarbe o cantitate de radiație electromagnetică monocromatică de frecvența:

$$\nu_{ik} = \frac{E_i - E_k}{h}. \quad (2.4)$$

Dacă $E_i > E_k$ se produce fenomenul de emisie.

Pentru $E_i < E_k$ se produce fenomenul de absorbție.

Totalitatea tranzițiilor radiative de pe nivelurile inferioare pe cele superioare formează spectrul de absorbție, iar totalitatea tranzițiilor radiative de pe nivelurile superioare pe cele inferioare formează spectrul de emisie.

Fenomenul tranziție se caracterizează prin frecvența radiației (lungimea de undă) și probabilitatea de tranziție. Fiecare spectru se caracterizează prin totalitatea valorilor frecvențelor și liniilor spectrale cât și prin distribuția intensității.

a. tranziția prin absorbție (figura 2.2)

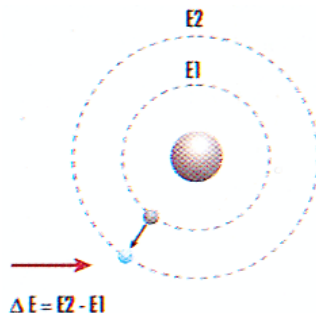


Fig. 2.2 Tranziția prin absorbție

O particulă poate trece de pe un nivel energetic inferior E_1 pe un nivel superior E_2 dacă aceasta interacționează cu un câmp electromagnetic exterior, absorbind de la acesta o cuantă de energie sau un foton care poartă energia $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$. Probabilitatea de a se produce această tranziție este exprimată prin:

$$dN_1 = B_{12} \cdot q_\nu \cdot N_1 \cdot dt, \quad (2.5)$$

unde dN_1 este numărul tranzițiilor de absorbție în unitatea de timp

B_{12} – coeficientul lui Einstein pentru absorbție

q_ν – densitatea spectrală a energiei câmpului electromagnetic cu care a interacționat particula

dt – timpul de interacțiune.

Deoarece singura stare stabilă este cea a nivelului fundamental, după un anumit timp, particulele excitate prin tranziții de absorbție revin de pe nivelurile superioare pe cel fundamental.

b. tranziția prin emisie spontană (figura 2.3)

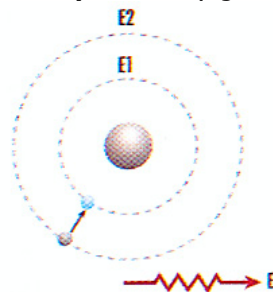


Fig. 2.3 Tranziția prin emisie spontană

Depopularea nivelului superior (prin tranziții radiative) determină particula să coboare spontan pe un nivel inferior. Caracterul acestor tranziții este aleator iar probabilitatea tranzițiilor este exprimată prin:

$$dN_{2 \text{ spont}} = -A_{21} \cdot N_2 \cdot dt, \quad (2.6)$$

unde $dN_{2 \text{ spont}}$ este numărul de tranziții în unitatea de timp

A_{21} – coeficientul lui Einstein pentru emisie.

Din cauza caracterului aleator al tranzițiilor, radiația produsă este necoerentă, policromatică și nedirectivă. Toate sursele luminoase obișnuite radiază spontan. Pentru producerea emisie spontane nu este necesar un câmp electromagnetic exterior.

c. tranziția prin emisie stimulată (figura 2.4)

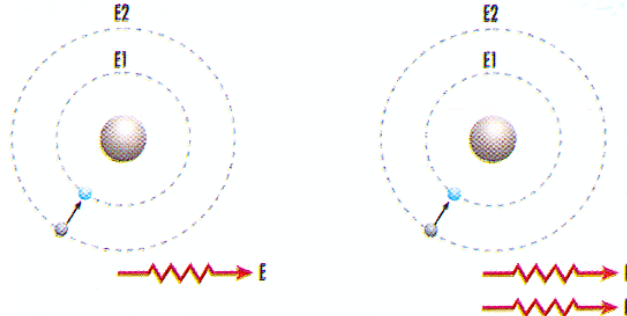


Fig. 2.4 Tranziția prin emisie stimulată

Această tranziție se manifestă atunci când depopularea nivelului energetic superior are loc prin stimularea particulei cu un câmp electromagnetic exterior. Un foton al câmpului exterior ciocnește o particulă din mediul aflat pe nivelul superior obligând-o să treacă pe nivelul inferior. Tranziția este însoțită de emisia unui foton care se alătură celui care a inițiat procesul, rezultând astfel doi fotoni, mecanismul stând la baza amplificării radiației electromagnetice.

Probabilitatea tranzițiilor în unitatea de timp este:

$$dN_{2 \text{ stim}} = -B_{21} \cdot q_{\nu} \cdot N_2 \cdot dt, \quad (2.7)$$

unde B_{21} este coeficientul lui Einstein pentru emisie stimulată

$dN_{2 \text{ stim}}$ – depopularea nivelului superior prin emisie stimulată în unitatea de timp.

Tranzițiile prin absorbție și cele stimulate sunt induse. La depopularea sistemului energetic superior fenomene de radiație spontană și de radiație stimulată se cumulează:

$$dN_2 = dN_{2 \text{ spont}} + dN_{2 \text{ stim}}. \quad (2.8)$$

Utilizând probabilitățile de depopulare se obține probabilitatea totală de depopulare:

$$dW_{21} = dN_2 = -(A_{21} + B_{21} \cdot q_{\nu})N_2 dt. \quad (2.9)$$

Probabilitățile de tranziție sunt egale în condiții de echilibru termodinamic:

$$dW_{21} = dW_{12}, \quad (2.10)$$

ceea ce conduce la:

$$B_{12} \cdot q_{\nu} \cdot N_1 = A_{21} \cdot N_2 + B_{21} \cdot q_{\nu} \cdot N_2, \quad (2.11)$$

de unde:

$$q_{\nu} = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21}}. \quad (2.12)$$

În relația de mai sus, raportul $\frac{N_1}{N_2}$ se poate exprima cu ajutorul legii lui

Boltzman, obținându-se:

$$q_{\nu} = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{g_1}{g_2} e^{\frac{E_1 - E_2}{kT}} - B_{21}}, \quad (2.13)$$

unde $E_2 - E_1 = h\nu$.

2.3 Proprietățile fundamentale ale radiației laser

Radiația emisă de laser reprezintă o fracțiune din radiația electromagnetică generată în interiorul cavității rezonante în baza proceselor de emisie stimulată și spontană ce caracterizează mediul activ laser.

Radiația spontană apare în mediul cuantic din interiorul cavității, în mod haotic, la momente diferite și reprezintă, prin aspectul incoerent care o caracterizează, o sursă de zgomot.

Caracterul aleatoriu al procesului de emisie spontană va determina, ca în condițiile reale de funcționare ale dispozitivelor laser, radiația emisă de acestea să

nu mai poate fi considerată perfect monocromatică, ci o radiație de înaltă puritate spectrală, dar de lărgime de bandă finită.

Cavitatea rezonantă care asigură reacția pozitivă aplicată între ieșirea și intrarea mediului cuantic amplificator, impune, prin modul său specific de funcționare, ca singurele unde capabile să-și aducă o contribuție importantă în procesul de amplificare prin emisie stimulată să fie undele care se propagă în lungul axei de simetrie a acesteia. Undele care formează un unghi oarecare cu axa cavității se vor reflecta de un număr foarte mic de ori, după care vor ieși din cavitate prin pereții laterali fără să participe la procesul de amplificare.

Radiația laser, constituită numai din undele care se propagă paralel cu axa cavității, va prezenta proprietăți direcționale deosebite care sunt impuse de parametrii caracteristici câmpului de unde staționare existent în interiorul cavității rezonante.

În procesul de emisie stimulată, mediul cuantic emite fotoni în fază cu fotoni stimulatori, radiația stimulată fiind o radiație coerentă de mare intensitate.

Directivitatea, monocromaticitatea, intensitatea și coerența radiațiilor laser, care rezultă din însuși procesul specific de funcționare a dispozitivelor laser, sunt proprietățile fundamentale care conferă „luminii” laser un caracter unic în raport cu alte surse de lumină obișnuite.

2.3.1 Coerența

Conceptul de coerență este legat de fluctuațiile electromagnetice care iau naștere prin suprapunerea mai multor componente. Practic, acest concept este determinat de noțiunea de interferență luminoasă. Teoria interferenței undelor luminoase a fost formulată în 1801 de Young. Emisia unui foton prin trecerea unui atom sau a unei molecule de pe starea excitată pe starea fundamentală are loc într-un interval de timp finit reprezentând durata de viață a particulei în starea excitată.

Fotonul este descris de o undă cu frecvența $\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$ a cărei amplitudine crește și descrește trecând printr-un maxim și determinând ceea ce se numește tren gaussian de unde (figura 2.5).

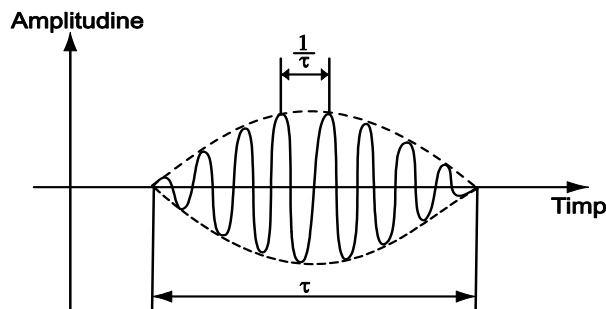


Fig. 2.5 Tren gaussian de unde

Parametrul τ este intervalul cel mai mare de timp în care amplitudinea și faza undei asociate fotonului pot fi precizate.

Conform teoriei ondulatorii - lumina reprezentând un fenomen vibratoriu în propagare - este de așteptat ca fenomenele de interferență definite pentru oscilațiile elastice să fie regăsite și în cazul luminii, sub forma unor fenomene de interferență optică.

Interferența luminoasă este fenomenul de suprapunere a undelor luminoase care determină apariția unei repartiții spațiale periodice de maxime și minime a intensității luminoase.

2.3.2 Directivitatea

Directivitatea reprezintă proprietatea radiației laser de a se propaga rectiliniu cu împrăștiere sau divergență foarte redusă.

Măsura directivității unui fascicul laser este unghiul de divergență dintre marginile fasciculului.

Proprietățile direcționale deosebite ale fasciculelor laser se datorează în principal condițiilor speciale impuse de cavitatea rezonantă procesului de amplificare prin emisie stimulată din mediu activ laser și în secundar, modului de propagare a razelor de lumină printr-un mediu optic izotrop.

Chiar din principiul său de funcționare laserul radiază toată puterea sa într-un fascicul direcționat, puternic colimat.

Datorită fenomenului de difracție, fasciculul laser prezintă o oarecare divergență. Pentru laseri, datorită formei speciale a cavității de rezonanță, undele se reflectă de un număr mare de ori pe suprafețele reflectante de capăt, fiind amplificate acele unde care se propagă de-a lungul axei cavității optice. Undele care formează un unghi oarecare cu axa rezonatorului se reflectă de un număr mic de ori. Aceste unde ies din pereții laterali fără să fie amplificate.

Radiația laser este formată numai de undele care se propagă paralel cu axa rezonatorului. Fasciculul obținut se consideră puternic direcțional dacă prezintă un unghi de divergență de $(0,05...1)^\circ$ pentru laserii cu mediu solid respectiv sub $1''$ pentru laserii cu mediu gazos.

Radiația laser obținută din radiația electromagnetică generată în mediul activ din interiorul cavității rezonante este de așteptat să fie caracterizată în propagare de dimensiunile și forma frontului de undă care îi descriu existența în acest domeniu. Undele staționare formate în interiorul cavității sunt descrise de modurile de oscilație ale radiației electromagnetice.

La definirea directivității se are în vedere raza w , a fasciculului, măsurată de la axa optică până la punctul în care intensitatea câmpului electric scade la $1/e^2$ din valoarea intensității la centru și de raza de curbură a frontului de undă R .

Considerând o cavitate rezonantă ideală, raza fasciculului de radiație și raza frontului de undă sunt determinate de relațiile:

$$w_2(z) = w_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right), \quad (2.14)$$

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right), \quad (2.15)$$

unde z este coordonata curentă, de-a lungul axei OZ , cu originea în planul transversal în care fasciculul are raza minimă w_0 (talia fasciculului)

λ – lungimea de undă a radiației.

Considerând o secțiune longitudinală a cavității rezonante se poate determina conturul fasciculului laser, conform schiței prezentate în figura 2.6.

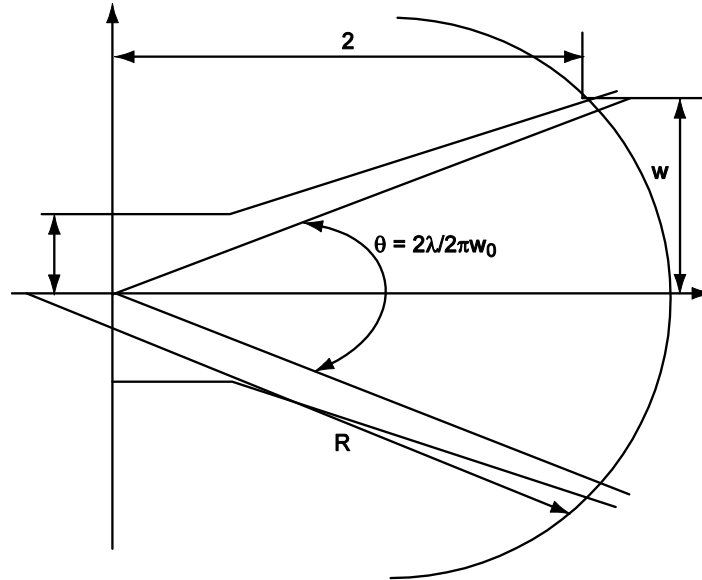


Fig. 2.6 Conturul fascicului laser

Conturul este de tip hiperbolic. Divergența fascicului exprimată prin unghiul sub care se împrăștie radiația electromagnetică se poate determina în acest caz ca fiind unghiul θ format de asimptotele la conturul hiperbolic. Având în vedere faptul că relația (2.14) a fost determinată în condițiile unei distribuții gaussiene de intensitate, rezultă că divergența în cazul unei emisii laser monomod fundamental este dată de relația:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0}. \quad (2.16)$$

Divergența minimă a unui fascicul laser se obține în cazul rezonatorului cu oglinzi sferice când distribuția transversală a amplitudinii respectiv a intensității câmpului este gaussiană.

Admițând că razele de curbură ale fronturilor de undă sunt la suprafața oglinzilor rezonatorului egale cu razele de curbură ale acestora, se poate demonstra cu ajutorul relațiilor (2.14) și (2.15) că în cazul general al unui rezonator cu oglinzi de apertură infinită și de raze de curbură R_1 și R_2 , separate la o distanță L , este satisfăcut criteriul de stabilitate:

$$0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1. \quad (2.17)$$

Talia fascicului în diverse secțiuni se stabilește cu relațiile:

$$w_1^4 = \left(\frac{\pi R_1}{\pi}\right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \quad (2.18)$$

$$w_2^4 = \left(\frac{\pi R_2}{\pi}\right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \quad (2.19)$$

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (2.20)$$

Considerând propagarea după axa OZ perpendiculară pe oglinzile cavității, dimensiunile Δx și Δy ale fasciculului reprezintă întinderea undei. Conform principiului de incertitudine se poate scrie:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \hbar, \quad (2.21)$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{1}{2} \hbar, \quad (2.22)$$

unde h este constanta lui Planck.

Impulsul \bar{p} trebuie să fie paralel cu axa OZ iar $|p_x| = |p_y| = 0$, astfel încât:

$$p_z \equiv p = hk = h \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.23)$$

Unghiul α dintre axa OZ și impulsul \bar{p} este, în medie, nul cu o incertitudine:

$$\Delta \alpha \equiv \frac{\Delta p_x}{p_z} \equiv \frac{\Delta p_y}{p_z} \alpha \frac{\lambda}{\Delta \lambda} \equiv \frac{\lambda}{\Delta \lambda}. \quad (2.24)$$

Precizia cu care este definit modul de unde staționare este limitată de fenomenul de difracție datorită dimensiunilor finite Δx și Δy ale fasciculului luminos. Când un fascicul luminos este limitat de o deschidere de dimensiuni Δx , rezultă pentru pata centrală de difracție o deschidere unghiulară:

$$\Delta \alpha \equiv \frac{\lambda}{\Delta x}. \quad (2.25)$$

Cu dimensiuni Δx și Δy de ordinul milimetrilor și $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ se obține $\Delta \alpha \approx 10^{-4}$ rad.

Această directivitate poate fi crescută folosind un telescop optic (sau expandor) format din două lentile (focarul imagine al primei lentile de distanță focală f' mică, coincidând cu focarul obiect al celei de-a doua lentile de distanță focală \bar{f} mare), deschiderea unghiulară $\Delta \alpha$ devenind:

$$\Delta \alpha' = \frac{f'}{\bar{f}} \Delta \alpha. \quad (2.26)$$

Una din consecințele foarte importante ale cvasiparalelismului fasciculului emis de laser este posibilitatea focalizării acestuia într-un spot al cărui diametru minim impus de limita de difracție este egal cu lungimea de undă λ a radiației.

Proprietățile de coerență și directivitate ale semnalului emis de laser echivalează laserul cu o sursă de lumină punctiformă, deși suprafața emisivă a acestuia are o întindere apreciabilă.

2.3.3 Monocromaticitatea

Monocromaticitatea este proprietatea unei radiații optice de a avea un interval spectral foarte mic. Sursele de radiație emit un spectru de radiație cu frecvențe de o anumită lărgime $\Delta \nu$.

Considerând $\lambda = \frac{c}{\nu}$ se obține:

$$\lambda + \Delta \lambda = \frac{c}{\nu - \Delta \nu}, \quad (2.27)$$

ceea ce determină:

$$\Delta \lambda = \frac{c}{\nu - \Delta \nu} - \frac{c}{\nu} = \frac{c \cdot \Delta \nu}{\nu(\nu - \Delta \nu)} \approx \frac{c \cdot \Delta \nu}{\nu^2}. \quad (2.28)$$

Variația relativă a lungimii de undă este egală cu variația relativă a frecvenței:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{\nu} \quad (2.29)$$

Această variație reprezintă o măsură a gradului de monocromaticitate a unei radiații optice.

Considerând că frecvența emisă de laser este determinată de un număr foarte mare de ori pentru un același timp de observație Δt , reprezentarea grafică a frecvenței măsurate ν în raport cu numărul de măsurări $N(\nu)$, în care această frecvență a fost obținută, va furniza curba de probabilitate a împrăștierii frecvenței emise de laser. Profilul gaussian al acestei curbe este prezentat în figura 2.7

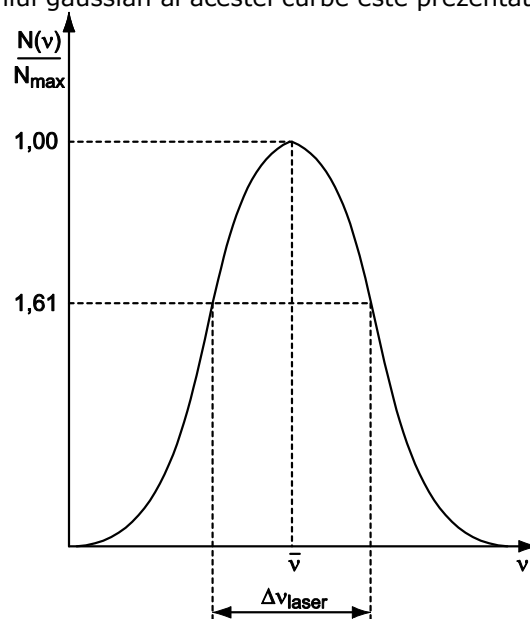


Fig. 2.7 Curba de probabilitate a împrăștierii frecvenței emise de laser

Se obține astfel o reprezentare a lărgimii spectrale $\Delta\nu$ laser și a frecvenței centrale $\bar{\nu}$ a radiației laser emise, în raport cu procesele aleatoare care o generează.

Monocromaticitatea radiației laser este o proprietate fundamentală a laserilor. Factorii care determină acest parametru sunt modurile de oscilație ale rezonatorului, lărgimea naturală și lărgimea Doppler a tranzițiilor atomice.

La cavitățile multimod (cu dimensiuni mult mai mari decât lungimea de undă a radiației) apare un număr foarte mare de moduri de oscilație, fiecărui mod corespunzându-i o anumită frecvență de vibrație. Pentru o undă plană perpendiculară pe suprafețele reflectante se poate scrie:

$$2L = q \cdot \lambda, \quad (2.30)$$

unde L reprezintă distanța dintre suprafețele reflectante

q – un număr întreg

λ – lungimea de undă.

Pentru a obține numărul q cât mai mare, rezonatoarele se dispun la distanțe relativ apropiate (Fabry – Perot). Din relația (2.30) se observă că diferența în frecvență dintre două rezonanțe succesive este:

$$\Delta\nu_r = \frac{c}{2L}, \quad (2.31)$$

c fiind viteza luminii.

Semilărgimea acestor rezonatoare Fabry – Perot este determinată de pierderea prin reflexie a unei care parcurge distanța L egală cu lungimea cavității, adică:

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{t_c} = \frac{c(1 - \alpha)}{L}, \quad (2.32)$$

unde α este coeficientul de reflexie al oglinzilor de la capetele rezonatorului.

Semilărgimea Doppler a liniei emise de sistemele atomice ale mediului activ aflat între oglinzile rezonatorului (în cazul în care mediul este gazos) este dată de expresia:

$$\Delta\nu_D = (\ln 2)^2 \nu_0 \frac{v}{c}. \quad (2.33)$$

Lumina laser are o puritate spectrală deosebită, deoarece modul axial care este legat strâns de rezonanța atomică are amplificarea cea mai mare, radiația laser concentrându-și lărgimea în jurul acestei rezonanțe. O oarecare lărgime a liniei apare deoarece emisia spontană nu este complet absentă și peste undele electromagnetice coerente se suprapun unde de faze arbitrare.

Semilărgimea liniei spectrale emisă de sistemele atomice prin efect laser se poate exprima prin relația:

$$\Delta\nu_{osc} \cong \frac{2\pi h\nu(\Delta\nu_c)^2}{p}, \quad (2.34)$$

în care p este puterea în modul dat.

Unul din aspectele cele mai importante de care trebuie să se țină seama la determinarea lărgimii de bandă a radiației este stabilitatea în timp a frecvenței de oscilație a cavității rezonante. Datorită modificării aleatoare a lungimii cavității rezonante sub acțiunea diferiților factori perturbatori (temperatura, vibrațiile, variația indicelui de refracție) frecvența centrală a radiației laser se modifică.

În tabelul 2.1 se prezintă câteva surse tipice de instabilitate în frecvență a rezonatorului laser în raport cu timpul de observație, cât și metodele utilizate curent pentru diminuarea efectelor surselor de instabilitate.

Tabelul 2.1

TIPUL	SCALA TIMPULUI DE OBSERVAȚIE	CAUZA	MODALITATE DE REMEDIU
Lungimea cavității	Termen lung	Variația temperaturii	- stabilizare termică - materiale cu coeficienți de dilatație termică reduși
Lungimea cavității	Termen scurt	Vibrații mecanice	- construcție de mare rigiditate - izolare bună la vibrații
Indicele de refracție	Termen lung	Modificări de presiune în interiorul cavității	- stabilizare termică - stabilizarea curentului din plasma tubului de descărcare (laseri cu gaz)
Indicele de refracție	Termen scurt	Modificări de presiune în interiorul cavității	- izolație acustică - cavitare rezonantă închisă

2.3.4 Intensitatea radiației

Intensitatea radiației laser este puterea mediată în timp, transportată de radiația laser prin unitatea de suprafață, din puterea eliberată prin emisie stimulată în volumul mediului activ laser.

În procesul de emisie stimulată, sincronizarea care există între momentele de producere a fotonilor prin tranziția atomilor sau moleculelor de pe starea energetică superioară către starea energetică inferioară, determină ca fiecare nou foton emis să fie în fază cu ceilalți, amplitudinea fasciculului de radiație crescând la maximum posibil.

Orice fotodetector sesizează nu amplitudinea unei unde ci intensitatea ei. Intensitatea undei electromagnetice este mărimea egală cu energia transportată de undă în unitatea de timp prin unitatea de suprafață perpendiculară pe direcția de propagare.

Intensitatea este proporțională cu pătratul amplitudinii.

Sursele obișnuite, având o strălucire limitată, se folosesc la un număr restrâns de aplicații. Oricât de mare ar fi temperatura lor sursele nu pot emite mai multă energie decât radiatorul perfect (corpul negru).

În procesul emisie stimulată care stă la baza efectului laser sistemele atomice excitate sunt silite să emită rapid și sincron astfel încât dacă se consideră și directivitatea ridicată a radiației se ajunge la densitate mare de radiație.

Laserii pot funcționa fie în regim continuu fie în impulsuri. La funcționarea în impulsuri energia acumulată în mediul activ la trecerea particulelor de pe un nivel pe altul este eliberată brusc. Se folosește modularea factorului de calitate al cavității (Q switching) la ieșirea laserului obținându-se astfel un impuls gigant sau puls de mare intensitate.

Datorită purității spectrale și directivității radiației laser, intensitatea de radiație a laserului este cu câteva ordine de mărime mai mare decât sursele de lumină obișnuite.

Intensitățile foarte mari ale radiației emise de laseri au permis utilizarea laserilor în domenii de activitate diverse, cum ar fi:

- transmiterea la distanță a energiei
- măsurarea distanțelor interplanetare
- producerea de plasmă fierbinți în procesele de fuziune
- prelucrarea fonică a materialelor.

2.4 Tipuri de laseri

O clasificare a laserilor se poate face după natura mediului activ folosit și anume:

- a. cu mediu activ solid
- b. cu mediu activ lichid
- c. cu mediu activ gazos
- d. cu semiconductori
- e. chimici

2.4.1 Laseri cu mediu activ solid

Tipurile de laseri ce aparțin acestei categorii se pot clasifica în raport cu modul de realizare a mediului în:

- laseri care utilizează ca mediu activ solid materiale cristaline sau amorphe dopate cu ioni activatori
- laseri care utilizează ca mediu activ joncțiunea a două materiale semiconductoare intrinseci.

Lasarii cu mediu activ solid prezintă două caracteristici importante:

- puterea de vârf a radiației deosebit de mare (1MW...100GW), obținută prin tehnici perfecționate de declanșare (la funcționarea în impulsuri (10^{-6} ... 10^{-13} s))
- durata lungă de viață a atomilor pe nivelurile stărilor excitate permit stocarea energiei.

Elementul activ la acești laseri îl constituie diferiți ioni care sunt înglobați într-un material gazdă sub formă cristalină sau amorfă (sticlă).

Materialul gazdă trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- transparentă optică ridicată
- izotropia proprietăților fizice
- conductibilitate termică ridicată
- rezistență mecanică ridicată.

Schema de principiu a laserului cu mediu activ solid este redată în figura 2.8.

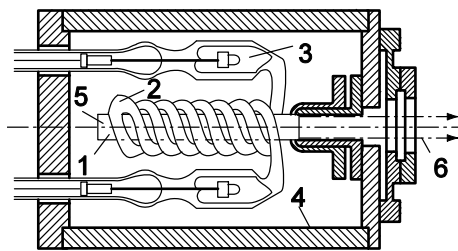


Fig. 2.8 Schema de principiu a laserului cu mediu activ solid

Elementul central este constituit dintr-un cristal sau o sticlă dopată cu atomii elementului activ. El este iluminat foarte intens cu ajutorul unui tub flash care îl înconjoară. Lumina flash-ului, a cărei acțiune este mărită prin prezența unui reflector, este parțial absorbită de materialul activ, ceea ce produce o inversiune a populațiilor elementelor active conținute în cristal sau în sticlă. Rezonatorul optic se obține prin „metalizarea” suprafețelor de la extremitățile barei de cristal sau sticlă, perfect prelucrate optic.

Laserul cu rubin

Laserul cu rubin este alcătuit, în principal, dintr-un cristal cilindric de rubin, două oglinzi paralele, argintate sau aurite și un tub de descărcare, în forma de spirală, umplut cu un gaz nobil, conectat la un condensator de mare capacitate.

Rubinul este un oxid de aluminiu care conține mici cantități de ioni de crom. Cilindrul de rubin utilizat are lungimea de ordinul centimetrilor și diametrul de ordinul milimetrilor.

Cele două oglinzi plane și paralele, șlefuite cu mare grijă, sunt argintate sau aurite în așa fel încât una dintre ele este complet opacă, iar cealaltă parțial transparentă, ca să poată permite razelor laser să iasă din instalație. Ele sunt așezate la capetele cilindrului de rubin. Uneori se metalizează chiar capetele cilindrului.

Tubul de descărcare, în forma de spirală, umplut cu neon, xenon sau amestecuri de neon și cripton este conectat la un condensator și funcționează

asemenea blitz-urilor de la aparatele fotografice. Tubul de descărcare emite într-un timp foarte scurt, de ordinul miimilor de secundă, o lumină obișnuită, dar intensă, care provoacă inversiunea populațiilor în cristalul de rubin.

În desfășurarea acestui proces o importanță deosebită o au impuritățile de crom înglobate în cristalul de rubin.

Rubinul este obținut pe cale sintetică din corindon (Al_2O_3) impurificat în mod controlat cu ioni de crom trivalent substituiți în rețea, în diferite proporții. Obținerea unor cristale cu structură monocristalină este necesară pentru realizarea unor medii active solide, cum ar fi rubinele și safirele, sau alte tipuri de cristale.

Rubinul conține 0,05% ioni de crom și are culoarea roz. Creșterea cantității de ioni de impurificare va determina schimbarea culorii către roșu deoarece ionii de crom din cristal absorb benzi largi din lumina verde și albastră în diferite proporții, în funcție de concentrația lor.

Sistemul de cristalizare al rubinului este romboedric iar din punct de vedere optic este un cristal uniax cu indicele de refracție 1,769. Rubinul roz s-a folosit la realizarea primului laser cu mediu activ solid din mai multe considerente:

- este unul dintre cristalele cele mai răspândite, fiind foarte bine studiat din punct de vedere al spectrului de radiație emis
- corindonul este produs pe scară largă datorită multiplelor sale aplicații în tehnică
- tehnologia de prelucrare este bine pusă la punct
- laserul cu rubin poate lucra la temperatura camerei.

Diagrama nivelurilor de energie ale ionilor de Cr^{+++} este prezentată în figura 2.9.

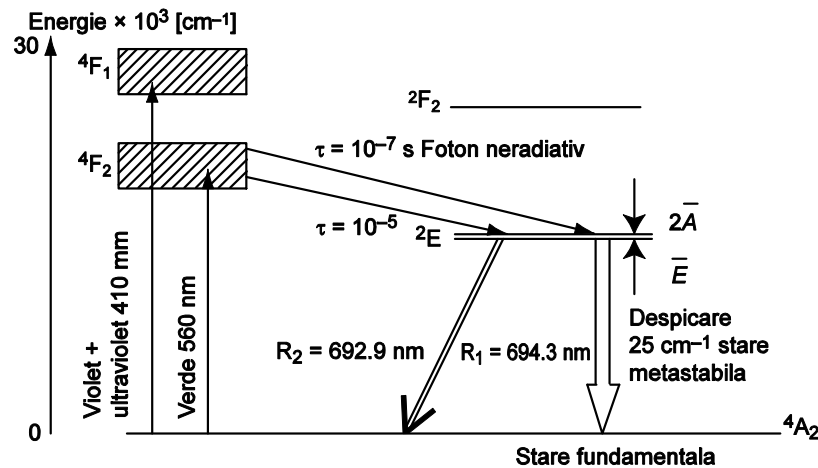


Fig. 2.9 Diagrama nivelurilor de energie ale ionilor de Cr^{+++}

Benzi de energie iau naștere datorită interacțiunii ionilor de crom cu atomii rețelei cristaline în care sunt inserați. Această interacțiune provoacă despicarea unor niveluri sub forma unui dublet. Nivelul $2E$ este despicat în subnivelele E și $2A$ separate la 25 cm^{-1} .

În același mod este separată și starea fundamentală.

Laserul cu rubin are o comportare dependentă de temperatură cu variații ale lungimii de undă de la $\lambda = 693,4 \text{ nm}$ la 77 K până la $694,5 \text{ nm}$ la 350 K .

Realizarea unui laser presupune o cavitate rezonantă și un sistem de pompaj. Cavitatea rezonantă va fi constituită din chiar mediul activ, iar sistemul de excitație este optic (singurul utilizabil la laserii cu mediul activ solid).

Structura laserului este prezentată în figura 2.10.

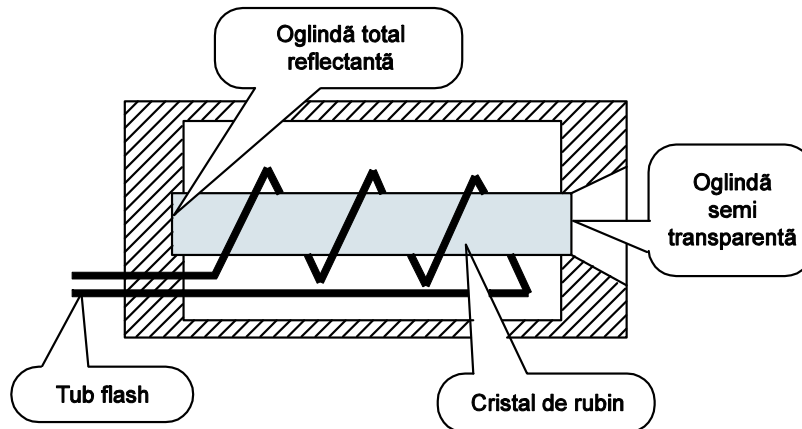


Fig. 2.10 Structura laserului

Cavitatea rezonantă este sub forma unei vergele cilindrice cu diametrul de 5 mm și lungimea de 40 mm tăiate din cristal de rubin astfel încât axa optică a cristalului să coincidă cu axa cilindrului. Suprafețele de bază ale cilindrului au fost șlefuite plan cu abaterea de la paralelism de maxim 1° . Acestea au fost, de asemenea, argintate pentru a produce reflexia multiplă.

Sistemul de pompaj constă dintr-un tub sub forma unei spirale, cu descărcare în gaze - un amestec de neon și krypton (tub flash). Alimentarea se face cu o baterie de condensatori la 400 μF la 4 kV. Lampa funcționează în impulsuri cu durată 200 μs . Spirala înfășoară bara de rubin (în mod coaxial). Structura este înconjurată de un cilindru acoperit cu un strat reflectant de oxid de magneziu. Lampa emite la 560 nm.

Dacă este depășit pragul de pompaj, lumina provenită de la primii fotoni emiși spontan este reflectată de un număr mare de ori (mii de ori), în rezonator crescând continuu în intensitate.

În acest mod ia naștere o undă intensă, coerentă, monocromatică și direcțională. Pentru a se permite ieșirea unei fracțiuni de undă, argintarea suprafețelor de capăt se face până la un coeficient de transmisie de 5%.

Pentru îmbunătățirea calității semnalului laser și reducerea puterii de pompaj este necesar ca laserul să lucreze la temperaturi scăzute. Dacă se scufundă cristalul de rubin într-un vas Dewar cu azot lichid se observă că:

- puterea de pompaj scade cu 30% pentru obținerea efectului laser
- linia R_1 se îngustează de două ori.

Pentru a asigura pompajul optic în condițiile imersării cristalului în azot lichid se folosește o structură specială.

Capătul barei este numai din materialul gazdă (Al_2O_3) sub forma unui trunchi de con.

Lampa de pompaj are formă cilindrică. Se focalizează lampa cu xenon pe zona tronconică a cristalului, iar datorită indicelui de refracție mai mare al capătului de safir se obține, prin reflexii multiple, concentrarea luminii pe bara cilindrică. S-a obținut, cu o putere de pompaj de 900 W, o putere maximă a radiației laser de 4 mW.

Pentru creșterea eficienței se folosesc tuburi flash cilindrice care împreună cu mediul activ sunt plasate în incinte eliptice de mare reflectivitate. Elementele sunt plasate în focarele incintei.

Bara de rubin are o lungime de 26,2 cm și un diametru de 0,6 cm. Energia de prag a laserului cu tub flash cilindric este de 150 J față de 2300 J la un laser cu tub flash în spirală. Configurația prezintă multiple avantaje cum ar fi răcirea facilă care se poate face cu răcitor circulant, cu criostat situat în afara carcasei, cu filtru pe pereții reflectanți.

O îmbunătățire ulterioară o constituie cavitatea eliptică multiplă. O soluție optimă este aceea a cavității cu patru elipse.

Un astfel de laser a fost realizat de Broznes. Bara de rubin are lungimea de 15 cm și diametrul de 1 cm.

Aranjamentele cu mai multe tuburi flash asigură o iluminare uniformă a cristalului. Sistemele sunt limitate la 4 secțiuni eliptice deoarece peste acest număr nu se mai obține o creștere a eficienței pompajului datorită imperfecțiunilor de prelucrare a suprafețelor reflectante.

Lasarii pământuri rare și laserul cu neodim

Laserul cu rubin prezentat face parte din categoria laserilor cu 3 niveluri energetice. Deoarece nivelul inferior este chiar starea fundamentală este necesară o energie de pompaj mare pentru producerea radiației laser. Acest lucru se petrece deoarece este necesară excitarea a cel puțin jumătate din particulele aflate pe nivelul inferior. Înlăturarea acestui dezavantaj (coborârea puterilor minime de pompaj), se realizează folosind laseri cu patru niveluri energetice, la care nivelul final al acțiunii laser nu este starea fundamentală, ci una intermediară. Această stare trebuie să fie suficient de înaltă față de starea fundamentală, pentru ca numărul de sisteme atomice din ea să fie mic comparativ cu numărul sistemelor atomice din starea fundamentală. Trebuie să fie, de asemenea, suficient de apropiată pentru a se putea goli rapid prin tranziții neradiative. Este necesar un decalaj de $(100...1000)\text{cm}^{-1}$ între nivelul respectiv și starea fundamentală. Astfel inversiunea de populație se va putea produce rapid necesitând o putere de pompaj scăzută. Acest lucru va fi benefic pentru laserii cu funcționare continuă.

Substanțele ce îndeplinesc cel mai bine condițiile enumerate sunt cele pe bază de neodim (Nd), europiu (Eu), erbiu (Er), samariu (Sm) și uraniu (U).

Elementele fac parte din categoria pământurilor rare și a actinidelor.

Un exemplu îl reprezintă laserul cu $\text{CaF}_2:\text{U}^{+++}$ pentru care schema nivelurilor energetice este prezentată în figura 2.11.

Mediul activ este cristalul de fluorură de calciu (CaF_2) în care s-a înglobat o cantitate mică de ioni de uraniu trivalent (U^{+++}) în procent de 0,05%.

Deoarece ionii de U^{+++} au benzi de absorbție în verde și albastru, cristalul $\text{CaF}_2:\text{U}^{+++}$ are culoarea roșie. Acești ioni au două linii de fluorescență puternice 2 μm și 2,6 μm .

Prin absorbția luminii verzi la $\lambda = 550 \text{ nm}$, ionii de uraniu se transferă în banda de pompaj P (are loc inversiunea de populație). Prin tranziții neradiative se trece pe nivelul $^4\text{I}_{11/2}$ unde se acumulează în număr mare. Starea aceasta este metastabilă. Prin trecerea pe nivelul E are loc emisia laser. Radiația este în domeniul IR cu $\lambda=2,45 \mu\text{m}$ sau $\nu = 4016 \text{ cm}^{-1}$.

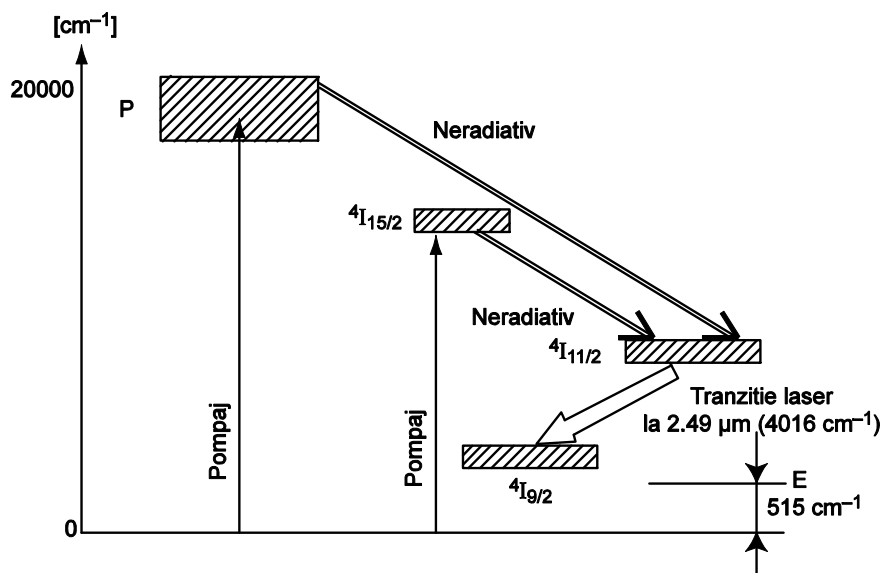


Fig. 2.11 Schema nivelurilor energetice pentru laserul cu $\text{CaF}_2:\text{U}^{+++}$

2.4.2 Laseri cu mediu activ lichid

Odată demonstrată funcționarea laserilor cu sticlă dopată cu neodim și a posibilității utilizării ca mediu gazdă a unor structuri necristaline, cercetările s-au extins și în ceea ce privește realizarea laserilor cu mediu activ lichid.

Lichidele se pot prepara ușor, au o puritate înaltă și prezintă condiții favorabile de răcire.

Sarcina electronică răspunzătoare de activitatea optică trebuie să fie protejată față de moleculele solventului. În acest sens se practică:

- folosirea unui agent chelatant (cu molecule chelate) care să formeze o rețea protectoare în jurul unui ion care își conservă fluorescența
- realizarea unei structuri particulare a solventului astfel ca ionii dizolvați să nu își piardă starea excitată.

Pentru obținerea emisiei laser a fost necesară rezolvarea a două probleme:

1. găsirea unor medii lichide care să prezinte benzi de absorbție largi în vecinătatea nivelurilor energetice ale atomilor activatori
2. asigurarea unei izolări suplimentare a atomilor activatori deoarece ecranarea acestor atomi din grupa pământurilor rare s-a dovedit insuficientă pentru izolarea nivelurilor energetice de vibrația naturală a moleculelor lichidului (reducerea termalizării rapide a populațiilor) condiție ce poate fi satisfăcută doar de unele materiale.

Lasери organici

Primul laser cu mediu lichid a fost realizat folosindu-se compuși organici complecși numiți chelați. Aceștia reprezintă medii lichide organice unde ionii atomilor activatori ca europiu (Eu) și terbiu (Tb) sunt izolați de acțiunea structurilor moleculare vecine și de învelișul format de ionii chelatici în jurul lor.

În figura 2.12 se prezintă izolarea atomului din categoria pământurilor rare. Structurile ionice monovalente cuplate ionului de Eu prin intermediul a doi atomi de oxigen se numesc liganzi.

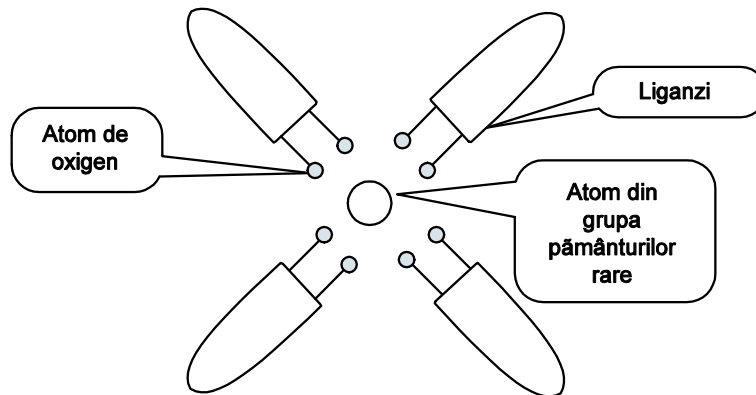


Fig. 2.12 Izolarea atomului din categoria pământurilor rare

Legăturile chelaților cu europiul se împart în două grupe $\text{Eu}(\text{X}_3)$ și $\text{Eu}(\text{X}_4)\text{Y}$, existând posibilitatea cuplării a trei sau patru ioni chelatici X, ca liganzi monovalenți la ionul trivalent al europiului.

În cazul legăturilor cu patru ioni chelatici și în prezența ionului pozitiv Y, proprietățile optice sunt mai bune, obținându-se intensități de fluorescență ridicate și valori de prag ale acestora relativ coborâte.

Transferul energetic este slab dacă solventul utilizat conține atomi grei și este ușor atunci când conține hidrogen.

Ca solvenți pentru mediile organice complexe s-au folosit alcoolul metilic și alcoolul etilic care poate fi amestecat cu dimetilformaldehydă sau acetonitril.

S-a încercat să se realizeze cu un lichid echivalentul unui laser cu sticlă dopată, ținând seama de următoarele exigențe:

- solventul trebuie să aibă o constantă dielectrică mare pentru a realiza o concentrație satisfăcătoare a compușilor ionici care produc efectul laser
- solventul se impune să fie transparent în zona spectrală în care se prevede emisie stimulată
- solventul nu trebuie să dezexcite ionul deoarece emisia unei cuante de lumină de către un ion corespunde unei modificări a orbitelor electronice iar energia de excitare poate fi transformată, cu mare probabilitate, în agitație termică, provocând excitarea nivelurilor vibraționale.

Figura 2.13 prezintă schema nivelurilor energetice ale moleculei de chelat.

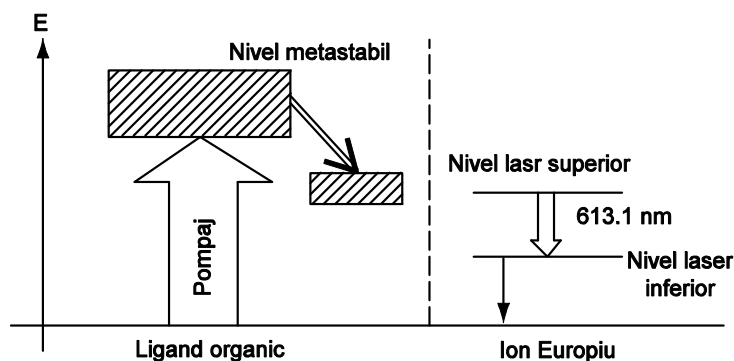


Fig. 2.13 Schema nivelurilor energetice ale moleculei de chelat

Liganzii organici absorb radiație de pompaj și ajung într-o stare energetică superioară din care pot reveni direct în starea fundamentală. În cazul moleculelor care conțin ioni activatori se poate reveni în starea fundamentală prin intermediul unei stări metastabile care coincide cu nivelul energetic superior al ionului de europiu.

Lasere anorganici

Se folosesc ca materiale gazdă soluții anorganice. Deși nu există legături ca în cazul chelaților, atomii de pământuri rare nu sunt complet liberi ci protejați de „învelișuri de solvent” ce pot ecrana atomii activatori de vibrațiile naturale caracteristice mediilor lichide. Structura învelișului molecular este prezentată în figura 2.14

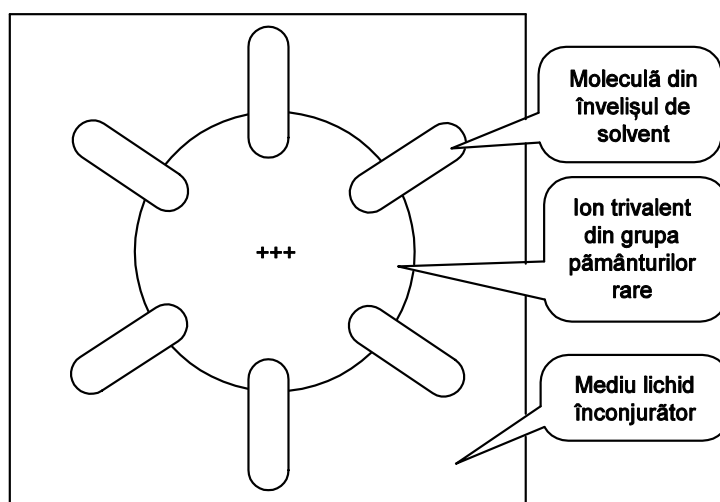


Fig. 2.14 Structura învelișului molecular

Raportul dintre procesele în care cedarea energiei are loc prin emisia unui foton și procesele în care energia este cedată ca energie vibrațională învelișului de solvent este dependent de masa celui mai ușor atom al moleculei solventului.

Cele mai multe lichide anorganice conțin atomi ușori de hidrogen sau deuteriu astfel încât procesele predominante sunt date de transferul vibrațional al energiei învelișului de solvent și nu de emisia spontană a unui foton. Termalizarea rapidă a populațiilor nu permite în aceste condiții apariția efectului laser.

Pentru realizarea laserilor cu medii active lichide anorganice s-au folosit atomi anorganici ce conțin numai atomi foarte grei.

Primul laser de acest tip a fost realizat de Lempiky și Heller. Avea o eficiență de zece ori mai bună decât laserul cu chelați (emițând la 1055 nm). S-a folosit ca atom activator neodimul și ca mediu gazdă oxiflorura de fosfor (POCl_3) sau oxiclorigura de seleniu (SeOCl_3), în care oxigenul este cel mai ușor atom. S-a utilizat un rezonator cu lungimea de 15 cm și diametrul de 0,6 cm. Nu este necesar în toate cazurile un rezonator de construcție specială (reflexiile totale de pe suprafețele de separație dintre lichid și tubul de sticlă permit apariția radiației) însă în aceste cazuri direcționalitatea radiației este foarte coborâtă. Acest tip de laser nu a fost utilizat datorită variației foarte puternice a indicelui de refracție cu temperatura și implicării unui mediu de toxicitate mare.

Un alt laser cu mediul activ lichid este laserul cu rodamină 6G care a fost realizat pentru prima dată de Sorokin și Lankard.

Deoarece lărgimea de bandă a spectrului de fluorescență este de ordinul zecilor de μm , rezultă un număr mare de niveluri excitate implicate. Această categorie de laseri este cunoscută și sub numele de categoria laserilor cu coloranți organici.

Lasarii cu mediu activ lichid prezintă unele dezavantaje:

- apar pierderi prin difuzie datorită variației indicelui de refracție cu temperatura lichidului
- nu sunt destul de fluorescente, iar dacă se dizolvă o impuritate într-un solvent și excitarea este posibilă, există șanse mari ca energia să fie disipată, producând agitație termică.

2.4.3 Laseri cu mediu activ gazos

Așa cum indică și numele, mediul activ pentru acest tip de laseri este un gaz sau un amestec de gaze.

Mediile gazoase s-au prezentat, încă de la început ca deosebit de promițătoare în realizarea unor medii active laser deoarece interacțiunea atomică sau moleculară, mai redusă, determină o cunoaștere mai bună a nivelurilor energetice caracteristice.

Într-un mediu activ gazos, spre deosebire de mediile solide și lichide, atomii sau moleculele se găsesc într-o izolare relativă, astfel că liniile de emisie și absorbție caracteristice acestora se prezintă în general foarte înguste.

Această lărgime redusă a liniilor de emisie este desigur o caracteristică extrem de avantajoasă în obținerea acțiunii laser, ea contribuind atât la asigurarea unui câștig ridicat în mediu, cât și la definirea unei coerențe temporale deosebite a radiațiilor emise.

Nu la fel de avantajoasă se prezintă și lărgimea redusă a liniilor de absorbție, deoarece aceasta va determina în consecință o reducere a posibilităților de realizare a pompajului.

Principalele avantaje ale laserilor cu gaz sunt:

- câștig ridicat
- posibilitatea funcționării continue
- puteri de emisie deosebit de mari (100KW în regim continuu)
- randamente superioare (peste 30%)
- puritate spectrală ridicată
- simplitate constructivă.

Un mecanism de excitare este modul în care se produc atomi sau molecule în stare excitată. Mecanismele de excitare folosite la laserii cu gaz sunt:

- prin ciocniri electronice
- prin transfer rezonant de energie
- excitarea prin pompaj optic
- excitarea prin procese gazodinamice
- excitarea prin reacții chimice
- excitarea prin efect Penning.

Excitarea prin ciocniri electronice este cea mai utilizată metodă care apare în urma unei descărcări electrice în gaz cu ajutorul unei surse de curent continuu, pulsatorie, de radiofrecvență. În urma descărcării se produc ioni și electroni liberi care primind energie cinetică suplimentară prin accelerare în câmp electric vor excita prin ciocniri repetate o moleculă sau un atom neutru.

Excitarea prin pompaj optic se realizează dacă sursa de radiație (de pompaj) o reprezintă o lampă cu bandă largă sau un fascicul monocromatic.

Metoda pompajului cu laser este folosită din 1970, avantajul fiind posibilitatea depozitării energiei pe niveluri preferențiale din mediul pompat. Se ating niveluri de pompaj mai mari prin focalizarea facilă a laserului în volume mici.

Excitarea prin pompaj optic este folosită la laserii în IR îndepărtat sau la unii laseri moleculari (CO_2 , CF_4 , NOCl).

Se disting cinci familii de laseri cu gaz:

- atomici
- ionici
- moleculari
- excimeri
- cu vapori metalici

2.4.3.1 Laseri atomici

Majoritatea laserilor atomici lucrează în emisie continuă cu puteri de ordinul μW ... mW și oscilează după tranziții în infraroșu apropiat și mijlociu cât și în domeniul roșu.

După procesele care stau la baza inversiunilor de populație acești laseri sunt de mai multe feluri:

- laseri cu ciocniri atom - atom (laserul cu He-Ne)
- laseri cu ciocniri atom-moleculă (laserul cu Ne - O_2 , emisia C sau O_2 în amestecurile $\text{CO} + \text{Ne}$, $\text{CO} + \text{He}$, $\text{CO}_2 + \text{Ne}$, emisia N_2 în amestecurile $\text{N}_2\text{O} + \text{He}$, $\text{No} + \text{Ne}$ sau emiși Br în $\text{Br}_2 + \text{Ar}$)
- laseri cu ciocniri electronice (laserii cu gaze nobile Ne, He, Ar, Xe, Kr sau laserii cu halogeni Cl_2 , I, Hg)
- laseri pompați optic (laserul cu Hg sau Cs)

Laserul cu He-Ne este reprezentativ în cadrul categoriei laserilor cu gaz. Mediul gazos al acestui laser este alcătuit dintr-un amestec de heliu și neon în proporție de aproximativ (85-90%) și respectiv (15-10%) la o presiune de 133,322 Pa.

Oglinzile au o planeitate de $\lambda/200$ fiind acoperite cu straturi dielectrice determinând o reflectivitate de 99% la $\lambda = 1,15 \mu\text{m}$. Alinierea oglinzilor s-a făcut cu o precizie de $5''$. Se realizează o excitare cu semnal de radiofrecvență.

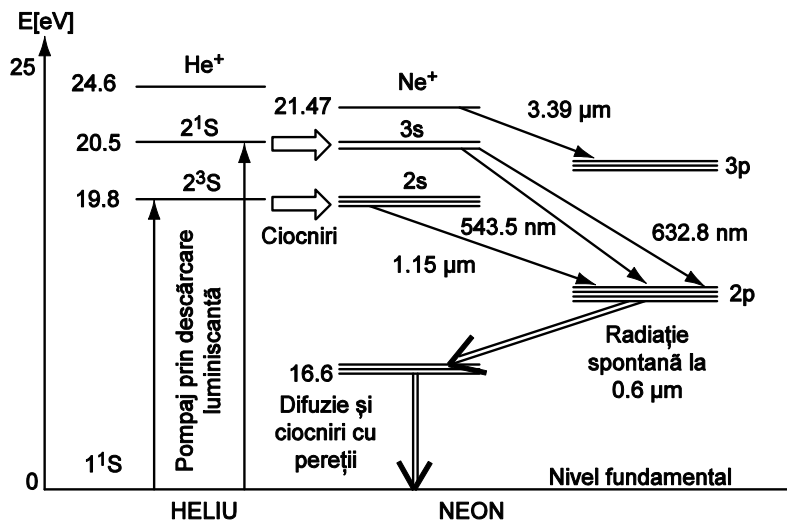


Fig. 2.15 Diagrama parțială a nivelurilor energetice la laserul cu He-Ne

Particula activă la laserul cu He-Ne este Ne iar He servește numai la excitarea acestor atomi. Neonul are un număr foarte mare de tranziții (130) extinse în domeniul (0,543...133) μm .

Figura 2.15 prezintă diagrama parțială a nivelurilor energetice la laserul cu He-Ne, folosindu-se notația Paschen.

Pentru ca inversiunea de populație să se mențină este necesar ca nivelurile inferioare să se depopuleze rapid (3p și 2p). Aceasta se realizează prin tranziție spontană pe nivelul 1s care trebuie de asemenea dezexcitat. Depopularea sa se realizează prin difuzie și ciocniri cu pereții tubului laser, diametrul inferior având o foarte mare importanță.

Prin ciocniri de speța întâi, atomii de heliu aflați în starea fundamentală sunt excitați pe nivelurile metastabile 2^3s și 2^1s , procesul fiind exprimat prin relația:



Prin ciocniri de speța a doua se realizează excitarea atomilor de pe 2s și 3s:



Pentru separarea oscilației se folosesc elemente dispersive (prisme sau rețele) cu $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$. Se pot aduce în oscilație linii din spectrul vizibil verde cu $\lambda = 0,54 \mu\text{m}$ sau roșu cu $\lambda = 0,73 \mu\text{m}$.

Banda liniilor emise de laserul cu He-Ne este determinată de:

- lărgirea colizională (0,64 MHz la 66,66 Pa)
- lărgirea naturală (19 MHz)
- lărgirea Doppler (1700 MHz, $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$, $T = 300 \text{ K}$).

Pentru a obține oscilația laser pe un singur mod longitudinal se folosește o cavitate suficient de scurtă (15...20) cm.

Principalele caracteristici ale laserilor cu He-Ne:

- sunt laseri cu puteri de ordinul μW ...mW
- divergența fasciculului este (0,1...3) mrad, la un diametru de (1...3) mm
- gradul de polarizare al radiației este de 100%
- stabilitate a radiației emise, puritate spectrală ridicată, direcționalitate și coerență bune
- simplitate constructivă și de manipulare
- emisie în undă continuă în spectrul vizibil
- durata de viață este mii de ore.

Limitările care împiedică obținerea de puteri în undă continuă de ordinul watt se datorează mai multor cauze:

- puterea emisă atinge un maxim (mW) odată cu creșterea curentului de descărcare
- presiunea parțială a laserilor cu Ne este limitată.

Laserul cu mercur face parte din categoria laserilor cu pompaj optic.

Folosindu-se un amestec de vapori de mercur și azot s-a obținut o emisie laser continuă în domeniul vizibil de culoare verde cu $\lambda = 546,1 \text{ nm}$ în mercur neutru. Pompajul optic se adoptă în vederea excitării nivelului laser superior respectiv dezexcitării colizionale a nivelului laser inferior de tip metastabil.

2.4.3.2 Laseri ionici

Distanțele relativ mici dintre nivelurile energetice caracteristice atomilor neutri, limitează la valori coborâte cantitatea maximă de energie ce poate fi eliberată printr-o tranziție simultană între aceste niveluri și determină ca radiațiile emise de laserii atomici să se situeze în general în domeniul infraroșu apropiat și intermediar.

Pentru a evita această limitare, se prevede utilizarea în locul atomilor neutri atomi încărcăți electric, cunoscuți sub denumirea generală de *ioni*.

Pentru eliberarea unui electron din învelișurile periferice ale atomului neutru este necesară cedarea unei energii care este la nivelul energetic cel mai ridicat din diagrama energetică a atomului neutru. Prin eliberarea unui electron la cedarea energiei de ionizare se obține un ion caracterizat de o nouă structură energetică limitată superior de energia necesară unei duble ionizări.

Efectul obținut prin ionizare constă în definirea unor stări energetice posibile a căror spațiere este mult mai mare ca în cazul atomului neutru.

Oscilația laser într-un mediu gazos a fost observată la mercur simplu ionizat Hg II^1 .

În vederea acoperirii întregului spectru vizibil s-au realizat laseri cu Ar II , Kr II , Xe II .

În simbolul acestor laseri I, II, III au următoarele semnificații:

I – atomul neutru de mercur

II – atomul simplu ionizat

III – atomul dublu ionizat.

Linii laser foarte importante s-au obținut și pentru ionii atomilor de azot, oxigen, carbon, iod și clor.

Laserele ionice utilizează 32 elemente diferite și emit peste 400 lungimi de undă în domeniul cu $\lambda = (0,2358...1,555) \mu\text{m}$. Cel mai utilizat este laserul cu argon ionizat în cadrul laserilor cu gaze nobile și are mediul activ format din ioni de argon.

Posibilitățile de excitație sunt multiple (fig. 2.16).

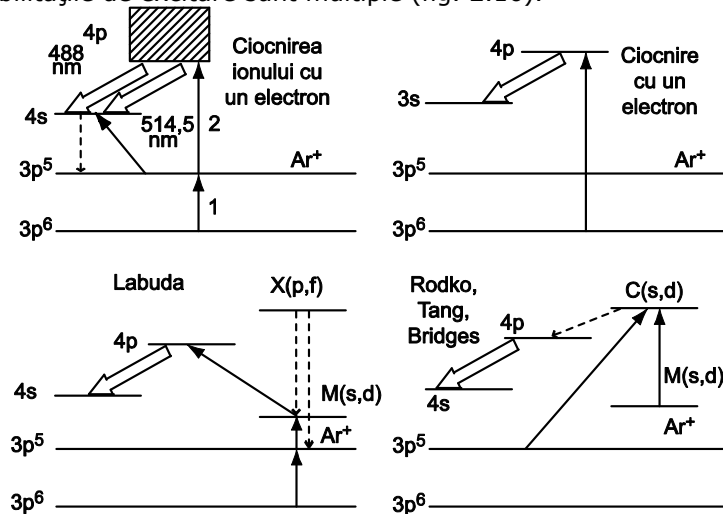


Fig. 2.16 Posibilitățile de excitație

În descărcare, aproximativ 1% din atomi sunt ionizați. Acești atomi ciocnindu-se cu electroni cu energia (2...4) eV produc stări ionice excitate.

Pentru nivelul laser superior timpul de viață este $\tau_1 = (7...10) \text{ ns}$ iar pentru nivelul laser inferior este $\tau_2 = 0,3 \text{ ns}$.

O fracțiune importantă a populației nivelului laser superior provine din cascade radiative de la stări superioare (25...50)%.

Puterea emisă în undă continuă este proporțională cu volumul mediului activ iar densitatea de putere crește proporțional cu pătratul densității de curent.

La curenți mici laserul funcționează aproape de valoarea de prag și se comportă ca un mediu lărgit neomogen, iar la curenți mari gradientul de presiune în tub datorită deplasării particulelor neutre din zona activă spre exterior contribuie la o dependență subpătratică.

Figura 2.17 prezintă variația densității de putere cu densitatea de curent.

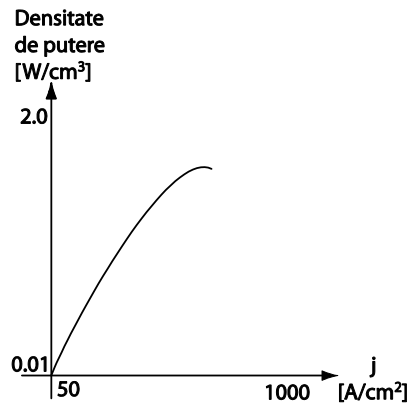


Fig. 2.17 Variația densității de putere cu densitatea de curent

Puterea maximă obținută cu un laser cu argon ionizat la lungimea de descărcare de 2,4 m și diametrul tubului 12 mm este 300 W în vizibil și 34 W în ultraviolet.

Laserul cu argon în funcționare continuă emite simultan 11 linii în domeniul vizibil.

Laserul cu Krypton este principial asemănător cu laserul cu argon. Extinde domeniul lungimilor de undă emise cu 15 linii în VIS și IR. Cea mai puternică linie emisă este în domeniul roșu. Se mai obțin linii în galben și albastru. Fasciculul emis de un laser umplut cu argon și Krypton este de culoare alba (ca lumina naturală).

Folosind același tub de descărcare laserul cu krypton emite o putere de 15 – 20 de ori mai mică (în roșu) decât a laserului cu argon.

2.4.3.3 Laseri moleculari

Acest tip de laseri se caracterizează prin puteri relativ mari de ieșire cu randamente de 25%. Randamentul ridicat se explică prin faptul că cea mai mare parte a energiei stărilor excitate este convertită prin emisie stimulată în radiație.

În molecule se obține efect laser prin mai multe tipuri de tranziții:

- tranziții de vibrație/rotație
- tranziții rotaționale
- tranziții vibronice.

În categoria laserilor moleculari reprezentativ este laserul cu CO₂.

Puterea și eficiența laserului cresc odată cu adăugarea de azot și heliu. Inițial a fost obținută o putere de 1 mW. Cercetările efectuate ulterior au permis obținerea de laseri cu puteri în emisie continuă de 100 kW și randament de (20-30)%.

Laserul cu CO₂ funcționează pe baza unui amestec de CO₂, N₂, He.

Gazele aditive din laserul cu CO₂ au un rol important în procesul de excitație și determină posibilitatea funcționării în emisie continuă la puteri și randamente ridicate. Azotul intervine în pompajul nivelului laser superior prin transfer rezonant de energie, iar heliul joacă un rol important în mărirea puterii de emisie și în

randamentul laserului. Se mai adaugă hidrogen și deuteriu ca gaze ușoare ale mediului activ. Rolul hidrogenului este acela de depopulare rapidă a nivelului laser superior.

Pentru laserii moleculari, o moleculă care se dovedește deosebit de importantă este cea a dioxidului de carbon. Aceasta este o moleculă relativ simplă, compusă din trei atomi, un atom de carbon și doi de oxigen, care sunt dispuși liniar, astfel încât atomul de carbon este cuprins între cei doi atomi de oxigen.

În acest caz există trei moduri distincte de vibrație (fig. 2.18...2.20):

- a. vibrație de întindere simetrică – fiecare atom de oxigen vibrează în sens opus celuilalt

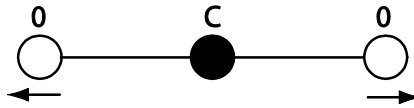


Fig. 2.18 Vibrație de întindere simetrică

- b. vibrație de întindere antisimetrică – vibrația atomilor de oxigen are astfel loc încât aceștia se deplasează în același sens



Fig. 2.19 Vibrație de întindere antisimetrică

- c. vibrația de deformare – atomii de oxigen și atomul de carbon vibrează pe direcții perpendiculare în raport cu linia care unește cei trei atomi. Întrucât această vibrație poate avea loc în două plane perpendiculare distincte, este o vibrație dublu generată.

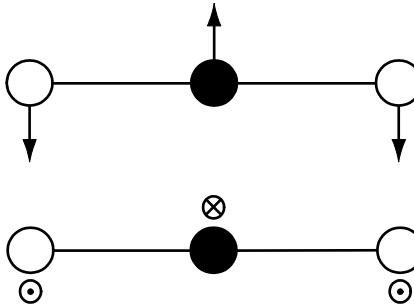


Fig. 2.20 Vibrația de deformare

Există mai multe tipuri de structuri laser care se utilizează industrial:

Lasere cu curgere longitudinală de gaz (lasere convenționali)

Sunt realizați dintr-un tub de sticlă răcit cu apă, prin care amestecul gazos circulă cu viteză mică (< 10 m/s). Diametrul tubului este de ordinul mm...cm iar lungimea sa de ordinul metrilor. La capătul tubului sunt montate ferestrele transparente în infraroșu sau chiar oglinzile. Excitarea se face prin descărcări electrice. Puterea de emisie este scăzută. Lungimea totală (înfășurată) a acestui tip de laser poate atinge 230 m, la o putere de 8,8 kW.

Lasere închise

Acești laseri nu necesită o circulare a gazului în timpul funcționării. Avantajele constau în eliminarea buteliilor de gaz de rezervă și a pompelor de

circulare a fluidului. Laserii devin portabili și ușor de instalat. Deosebit de importantă este împiedicarea disocierii moleculelor de CO_2 prin ciocniri electronice și menținerea concentrației constante a mediului activ. Aceasta se face prin alegerea corespunzătoare a metodelor de îmbinare a tubului de descărcare, alegerea unor electrozi corespunzători, introducerea de gaze de aditivare.

Un astfel de laser se realizează din sticlă de Pyrex cu trei cămăși coaxiale. Prima închide tubul de descărcare, a doua menține lichidul de răcire iar a treia formează un rezervor cu gaz.

Amestecul gazos conține CO_2 , N_2 , He la care se adaugă H_2 , Xe. Acești laseri se utilizează în studii spectroscopice de înaltă rezoluție, studii de poluare a aerului, interferometrie.

Lasери cu ghid de undă

Acești laseri se bazează pe folosirea unor tuburi de descărcare cu secțiuni mici. În construcția lor se prevăd materiale speciale de tip sticlă Pyrex, ceramică BeN și BeO, alumină. Ghidurile de undă au secțiune circulară, rectangulară și planară.

În figura 2.21 se prezintă structura unui astfel de laser.

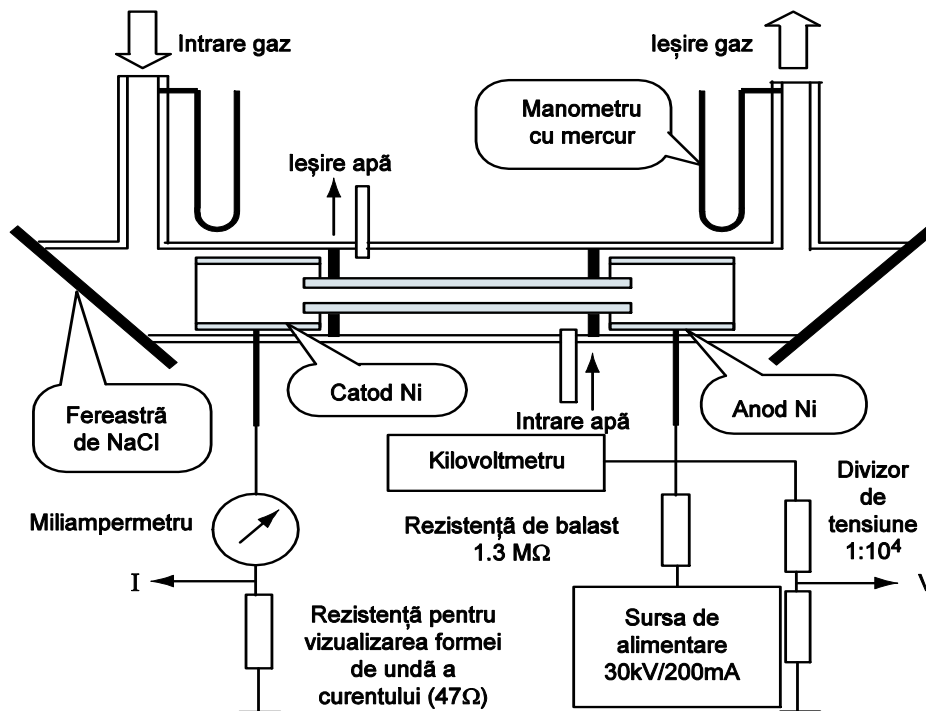


Fig. 2.21 Structura unui laser cu ghid de undă

Tuburile de descărcare conțin gaz la presiune ridicată. Utilizarea unor tuburi cu diametre mici este limitată de pierderile optice prin difracție la cuplarea radiației în spațiul liber dintre tuburi. Deoarece se pot obține benzi de oscilație de peste 1 GHz, laserii de acest tip se folosesc ca locatoare optice, în comunicații cu purtătoare de semnal laser, ca surse infraroșu de bandă largă.

Laseri cu curgere transversală de gaz

Pentru răcirea laserilor se folosește răcirea prin convecție (figura 2.22)

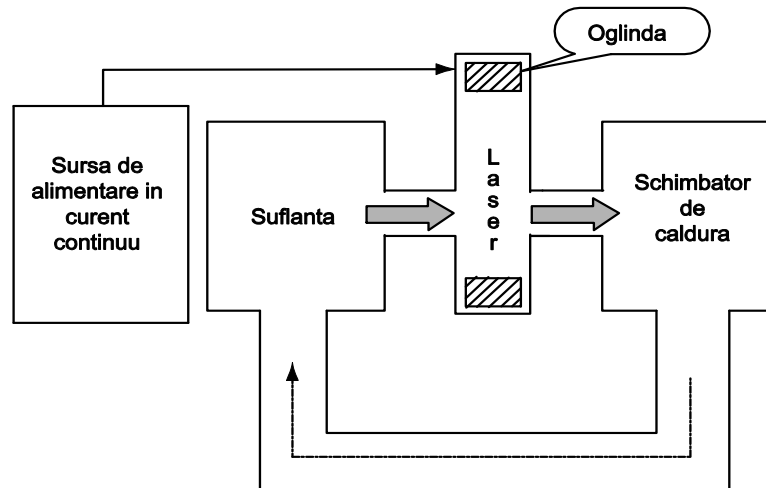


Fig. 2.22 Schema de răcire prin convecție

Laserul folosește ca putere utilă 10% din puterea de intrare, iar restul se transformă în căldură. Creșterea căldurii este un inconvenient privind inversiunea de populație, pe cale termică, a nivelurilor vibraționale joase, ale moleculei de CO_2 .

Laserii cu transport de gaz permit atingerea unor puteri de ordinul kW la o lungime a tubului de 1 m. Se folosesc construcții speciale cu anodi multielement și catod continuu. Răcirea se face cu apă.

2.5 Concluzii. Contribuții personale

Capitolul al doilea al tezei prezintă o sinteză bibliografică privind fundamentele teoretice ale emisieii laser și o selecție dintr-un material foarte bogat referitor la soluțiile tehnice existente în prezent pentru obținerea fasciculelor laser.

În primele paragrafe sunt concentrate elemente referitoare la reperele cronologice semnificative pentru evoluția laserilor, la suportul fundamental al mecanismelor de stimulare și amplificare a radiației electromagnetice și la principalele caracteristici ale fasciculelor laser. Sunt evidențiate coerența, directivitatea, monocromaticitatea și densitatea de putere ridicată, ca principale proprietăți ale radiației laser, proprietăți esențiale pentru aplicația căruia îi este dedicat studiul din teză.

A doua secțiune a capitolului conține o succintă, dar relevantă prezentare a tipurilor de laseri existenți. Sunt comentate comparativ schemele de principiu și detaliile constructive specifice unor laseri cu mediu activ solid, lichid și gazos. Ultima categorie este dezvoltată pe subclase care se referă explicit la laseri atomici, ionici și moleculari. Pentru fiecare tip de laser descris sunt evidențiate soluțiile practice de realizare a inversiunii de populație și de amplificare a radiației, astfel încât să rezulte fascicule laser utile cu caracteristici bine determinate privind domeniul și puritatea spectrală, dimensiunile de gabarit radial și puterea.

Materialul cuprins în prezentul capitol rezumă, de fapt, stadiul actual privind posibilitățile de alegere a unei surse neconvenționale de radiație și de implementare a acesteia în aplicații specifice din domenii foarte diverse, care au ca element comun un principiu de funcționare bazat pe existența acestui tip special de sursă, care este laserul.

Pe parcursul capitolului pot fi identificate drept contribuții personale următoarele:

- sinteza materialului bibliografic ancorat în domeniul fundamental, care deși acoperă o arie vastă de cunoștințe din fizica particulelor, optica cuantică, termodinamică, electromagnetism și chimie, este compactat în câteva secvențe cu caracter cuprinzător și coerent privind mecanismele de stimulare a emisiei de radiație și de amplificare a acesteia
- sinteza cunoștințelor referitoare la proprietățile geometrice, optice și energetice ale fasciculelor laser, cu evidențierea oportunităților tehnice pe care aceste proprietăți le facilitează
- selectarea spre prezentare și descriere a principalelor soluții de surse laser disponibile în prezent

[A3] [B4] [B5] [C9] [C10] [C11] [C16] [D8] [D9] [H1] [H3] [H4] [H5] [H6] [N3] [N5] [P2] [P3] [P4] [Q1] [S4] [S9] [T8] [V1] [***]

3. INTERACȚIUNEA FASCICULULUI LASER CU MATERIA

3.1 Încălzirea materialelor

3.1.1 Absorbivitatea

Modul în care decurge încălzirea unui material sub acțiunea radiației laser depinde de material, de modul de operare al sursei laser și de condițiile în care se produce iradierea.

Parametrul care caracterizează sintetic interacțiunea radiației laser cu substanța, conducând la încălzirea acesteia, este absorbivitatea radiației incidente. În acest sens este de remarcat că, în timp ce variația cu temperatura a parametrilor termofizici ai materialelor iradiate, în medii chimic inerte, la încălzirea între temperatura camerei și temperatura de topire, este de ordinul a câtorva zeci de procente, absorbivitatea superficială poate crește de câteva ori.

Cantitativ, absorbivitatea A se definește ca raportul dintre intensitatea radiației absorbite și intensitatea radiației incidente la un moment dat și într-un anumit loc de pe suprafața probei iradiate. Absorbivitatea materialelor la o anumită lungime de undă (absorbivitatea spectrală A_{ω}) determină direct comportarea acestora sub acțiunea radiației laser de putere la respectiva lungime de undă, acest fapt oferind un criteriu privind alegerea sistemelor laser utilizate în prelucrarea materialelor.

Absorbivitatea materialelor este greu de prezis teoretic, datorită dificultăților legate de identificarea și estimarea corectă a constituenților absorbivității intrinseci, pe de-o parte, iar pe de altă parte, datorită insuficienței datelor privind influența nivelului de finisare al suprafeței probelor, existenței defectelor și impurităților, ceea ce afectează valorile absorbivității extrinseci. De asemenea, pe durata încălzirii laser apar termodeformații dinamice ale suprafeței care modifică și ele absorbivitatea probei. Absorbivitatea materialelor depinde, în principiu, de lungimea de undă, de temperatură și de starea suprafeței probei.

S-a constatat experimental că absorbivitatea materialelor manifestă o tendință generală de scădere odată cu creșterea lungimii de undă a radiației incidente.

Analiza experimentală și teoretică a variației absorbivității intrinseci a unei probe în funcție de temperatura care se atinge pe suprafața sa arată că, în intervalul cuprins între temperatura camerei și temperatura de topire, absorbivitatea probelor crește de 5-6 ori. Pentru acest interval termic, evoluția reală a absorbivității în funcție de temperatură se descrie printr-o dependență aproximativ liniară. Pentru determinări mai precise se pot utiliza dezvoltări polinomiale de forma:

$$A(T) = \sum_{i=0} A_i T^i. \quad (3.1)$$

Experimental însă, pentru materialele uzuale, s-a obținut o bună filtrare cu polinoame liniare pentru dependența cu temperatura a absorbivității, folosirea unui termen pătratic fiind necesară numai pentru probele de wolfram.

În imediata vecinătate a temperaturilor de topire, modul de variație cu temperatura a absorbivității probelor se modifică datorită fenomenelor generate de schimbările structurale care au loc în țintă.

De importanță majoră pentru valoarea absorbivității unei probe este starea suprafeței acesteia. Gradul de finisare a suprafeței, prezența unor defecte și impurități sau a unor straturi de oxizi pe suprafață aduc o contribuție suplimentară în expresia generală a absorbivității prin absorbivitatea extrinsecă A_{ext} . Gradul de finisare al probelor influențează absorbivitatea acestora, deoarece rugozitatea oferă radiației zone de incidență oblică cu absorbivitate crescută, creează zone cvasi-închise în care radiația este captată și complet absorbită sau suprafețe absorbante suplimentare. Tehnicile de investigare permit, în prezent, ridicarea profilului real al rugozității suprafeței probelor cu o precizie de ordinul Å. Calculând transformata Fourier a rugozității superficiale (determinate experimental) se poate stabili expresia absorbivității datorate rugozității. Se arată că acest termen se poate neglija în cazul unor oglinzi de înaltă calitate, caracterizate de o rugozitate superficială aleatorie (contribuția fiind de 1-2 % din absorbivitatea intrinsecă a probei), dar poate deveni semnificativ, chiar mai mare decât absorbivitatea intrinsecă, în cazul unor probe metalice convenționale sau ale căror suprafețe prezintă structuri spațiale cvasiperiodice.

Studiile experimentale au arătat că absorbivitatea materialelor datorată defectelor și impurităților de pe suprafața acestora, este cu un ordin de mărime mai mare decât absorbivitatea intrinsecă, ceea ce conduce la supraîncălziri locale, deoarece, ca urmare a absorbției intense a radiației, defectul sau impuritatea devin un puternic generator de căldură.

Dimensiunea defectelor afectează drastic încălzirea lor, deși sfericele lor de influență termică nu variază în aceeași măsură. Microfisurile și porii microscopici existenți pe suprafața probei determină creșteri semnificative ale intensității câmpului electric laser, ce pot sta la originea unei reduceri substanțiale a pragurilor de distrugere superficială.

Pe suprafețele solide, iradiate laser, aflate în contact cu aerul sau cu gaze chimic active, se pot forma produși de reacție într-o cantitate suficientă pentru a imprima, ei înșiși, o anumită evoluție interacțiunii radiației laser cu ținta. Transformările chimice superficiale au un caracter nerezonant, fiind independente de lungimea de undă a radiației incidente și generate numai de încălzirea laser a țintei. Păturile de oxid de pe suprafața probelor au deseori o structură multistrat; în contact cu aerul se află stratul cel mai bogat în oxigen, în timp ce la frontiera cu materialul se află oxidul cel mai sărac în oxigen. De multe ori, prezența oxizilor pe suprafața probelor poate determina o creștere importantă a absorbivității, peste valorile intrinseci preconizate. În asemenea cazuri funcția $A(T)$ poate avea un caracter oscilant, ca rezultat al interferenței radiației laser în sistemul de pături material – oxid.

Conform formalismului Drude, orice material industrial conține electroni liberi supuși activității câmpului electric al radiației laser incidente într-un mediu vâscos, caracterizat printr-un parametru fenomenologic de atenuare τ , a cărui valoare este determinată de ciocnirile cu alți electroni, respectiv fononi. Considerând frecvența de relaxare electronică corespunzătoare, $\Gamma = \tau^{-1}$, modelul este descris de ecuația:

$$m^x \frac{d^2x}{dt^2} = -m^x \Gamma \frac{dx}{dt} - eE_0 e^{i\omega t}, \quad (3.2)$$

unde x este coordonata ce descrie poziția electronului, ω este frecvența unghiulară a radiației laser, m^x și e sunt masa efectivă și respectiv, sarcina electronului. Vectorul electric al undei laser incidente, de amplitudine E_0 , este orientat pe direcția x .

Domeniul de aplicabilitate al modelului Drude, numit și regiunea de relaxare, corespunde cazurilor în care curentul indus într-un anumit loc, la un moment dat, depinde nu numai de câmpul electric aplicat în acel moment în locul respectiv, ci

cumulează și influența câmpului electric la momente anterioare. Inerția electronilor care determină fenomenele de relaxare este inclusă în model prin termenul de atenuare vâscoasă.

Soluția staționară a ecuației (3.2) este

$$x = \frac{e}{m^x} \frac{E_0 e^{i\omega t}}{\omega^2 - i\omega\Gamma}. \quad (3.3)$$

Partea reală a cantității este de forma

$$-\frac{n_e}{E_0} \frac{dx}{e^{i\omega t} dt}, \quad (3.4)$$

și reprezintă raportul între componenta densității curentului electric în fază cu câmpul electric și intensitatea câmpului electric.

Se definește conductivitatea electrică σ :

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \Gamma}{m^x (\omega^2 + \Gamma^2)}, \quad (3.5)$$

unde n_e este densitatea electronilor liberi din metal.

Vectorul polarizație electrică este dat de relația: $P = -n_e e x$, sau

$$P = -\frac{n_e e^2}{m^x \omega} \frac{E_0 e^{i\omega t}}{\omega - i\Gamma}. \quad (3.6)$$

Constanta dielectrică relativă complexă a materialului $\tilde{\epsilon}_r$ este dată de relația:

$$\tilde{\epsilon} = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \quad (3.7)$$

unde $E = E_0 e^{i\omega t}$ este intensitatea câmpului electric. Înlocuind expresia (3.6) în relația (3.7) se va obține:

$$\tilde{\epsilon} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \Gamma^2} - i \frac{\Gamma \omega_{pe}^2}{\omega^2 (\omega^2 + \Gamma^2)}, \quad (3.8)$$

ω_{pe} fiind frecvența plasmăi dată de relația:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_e e^2}{m^x \epsilon_0}. \quad (3.9)$$

Ca ordin de mărime, frecvența plasmăi, pentru metale la temperatura camerei, este $\omega_{pe} \approx 10^{16}$ rad/s, dilatarea în volum a metalelor, ca efect al încălzirii, producând o variație slabă a acestei mărimi.

Indicele de refracție complex, \tilde{n} și absorbivitatea metalului la incidență normală, A_0 , rezultă din relațiile lui Fresnel:

$$\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} = n - i\chi \quad (3.10)$$

și

$$A_0 = 1 - \left| \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r} - 1}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r} + 1} \right|^2 = \frac{4n}{(n+1)^2 + \chi^2}, \quad (3.11)$$

unde n și χ sunt indicii de refracție propriu-zis și respectiv indicii de extincție al metalului. Notând:

$$Q = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \Gamma^2}, \quad (3.12)$$

din relațiile (3.8) și (3.9) se obține :

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[(1-Q)^2 + \left(\frac{Q\Gamma}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - Q + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

și

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[(1-Q)^2 + \left(\frac{Q\Gamma}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - Q + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} . \quad (3.14)$$

Înlocuind expresiile indicelui de refracție propriu-zis (3.13) și a indicelui de extincție (3.14) în expresia absorbivității (3.11), rezultă:

$$A_D = \frac{2\sqrt{2} \left\{ \left[(1-Q)^2 + \left(\frac{Q\Gamma}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - Q + 1 \right\}^{\frac{1}{2}}}{\left[(1-Q)^2 + \left(\frac{Q\Gamma}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2} \left\{ \left[(1-Q)^2 + \left(\frac{Q\Gamma}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - Q + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} + 1} . \quad (3.15)$$

Dacă $\omega_{pe}^2 \gg \omega^2 \gg \Gamma^2$ (de exemplu pentru Ag, Cu), relația absorbivității (3.15) se poate aproxima prin:

$$A_D \cong \frac{2\Gamma}{\omega_{pe}} . \quad (3.16)$$

În alte cazuri (de exemplu pentru Al și Au), pentru care $\omega_{pe}^2 \gg \omega^2 - \Gamma^2$, relația (3.15) se aproximează prin expresia:

$$A_D \cong 1 - \left(\frac{2\omega\Gamma}{\pi\epsilon_0\omega_{pe}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 + \frac{\omega^2}{\Gamma^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\omega}{\Gamma} \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (3.17)$$

O bună aproximație a absorbivității este:

$$A_D \cong 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{2\omega}{\pi\sigma_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 + \frac{\omega^2}{\Gamma^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\omega}{\Gamma} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} . \quad (3.18)$$

care rezultă din (3.11) pentru $n, \chi > 1$ la valoarea de curenți continuu ($\omega \cong 0$) a conductivității electrice.

O măsură directă a gradului de penetrare a radiației în metal este adâncimea de atenuare a radiației, numită și grosime a stratului pelicular, care, în limita de aplicare a formalismului Drude, se poate evalua din relația:

$$\delta_D = \frac{c}{\chi\omega} = \frac{c}{2\omega_{pe}} \frac{\left[2 \left(1 + \frac{\Gamma^2}{\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\left(1 + \frac{\Gamma^2}{\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.19)$$

c fiind viteza luminii în vid.

Pentru $\omega \gg \Gamma$ se poate aproxima:

$$\delta_D \cong \frac{c}{2\omega_{pe}}. \quad (3.20)$$

În domeniul frecvențelor joase ($\omega \ll \Gamma$) răspunsul inerțial al electronilor este relativ mic în raport cu atenuarea rezistivă și atunci, valoarea curentului indus într-un anumit loc din metal, la un moment dat, este strict determinată de valoarea instantanee a câmpului electric aplicat. Acest fenomen se numește efect pelicular normal. În aceste condiții, primul termen din membrul stâng al ecuației (3.2) se poate neglija și, în limita $\omega_{pe}^2 \gg \Gamma^2, \omega^2$, se obține:

$$n \cong \chi \cong \sqrt{\frac{\omega_{pe}^2}{2\Gamma\omega}}; \quad A_N \cong 2\sqrt{\frac{2\Gamma\omega}{\omega_{pe}}}; \quad \delta_N \cong \frac{c}{\omega_{pe}} \sqrt{\frac{2\Gamma}{\omega}}. \quad (3.21)$$

În cazul în care curentul indus într-un anumit loc din metal este determinat nu numai de valoarea locală a câmpului electric, ci și de mișcarea electronilor care ar putea ajunge în locul respectiv de la distanțe egale sau mai mici decât drumul liber mijlociu apare fenomenul numit efect pelicular anomal. Acest efect, pentru care tratarea clasică nu este adecvată, apare atunci când drumul liber mijlociu al electronilor este comparabil cu lungimea de undă și adâncimea de penetrare a radiației laser. Calculele conduc la următoarele expresii ale absorbivității și adâncimii de atenuare, datorate acestui efect:

$$A_A = \frac{3}{4} \frac{v_F(1-f)}{c \left(1 + \frac{\Gamma^2}{\omega^2} \right)} + \frac{\omega_{pe}^2}{2\omega^2} f \frac{v_f^3}{c^3}, \quad (3.22)$$

$$\delta_A \cong \left(\frac{m^* c^2 v_F}{2\pi n_e e^2 \omega} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.23)$$

unde $v_F = \frac{h}{m^*} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$ este viteza Fermi a electronilor, iar f este un parametru care caracterizează modul de prelucrare a probelor ($0 \leq f \leq 1$). Pentru probe înalt prelucrate superficial, $f \cong 1$. Se constată că efectul pelicular anomal poate fi interpretat ca un caz limită al formalismului Drude, pentru $\Gamma \gg \omega$.

La frecvențe suficient de ridicate, proprietățile optice ale metalelor sunt influențate și de tranzițiile între stările electronice aflate în benzi electrice diferite, aceste efecte nefiind incluse în formalismul Drude, efectul pelicular normal și efectul pelicular anomal.

În acest caz, tranzițiile interbandă au o influență neglijabilă pentru absorbția metalelor în domeniul infraroșu, cu excepția metalelor de tranziție.

Dacă la incidență normală absorbția radiației laser este independentă de polarizare, în cazul unei unde luminoase care cade sub un unghi θ , apar efecte semnificative legate de polarizarea radiației. Absorbivitățile suprafeței metalice pentru radiațiile polarizate liniar, paralel și respectiv perpendicular, în raport cu planul de incidență, în ipoteza $\theta < 90^\circ$, $n^2 + \chi^2 \gg 1$, se pot aproxima prin:

$$A_{\parallel}(\theta) = \frac{4n \cdot \cos \theta}{(n^2 + \chi^2) \cos^2 \theta + 2n \cdot \cos \theta + 1} \cong \frac{A}{\cos \theta} \quad (3.24)$$

și

$$A_{\perp}(\theta) = \frac{4n \cdot \cos \theta}{(n^2 + \chi^2) + 2n \cdot \cos \theta + \cos^2 \theta} \cong A \cdot \cos \theta, \quad (3.25)$$

cu A pentru incidență normală dat de relația (3.11), unde la numitor se neglijează unitatea. Incidența oblică are ca efect expunerea la iradiere a unor suprafețe multiplicare cu factorul $\frac{1}{\cos \theta}$.

3.1.2 Transferul de căldură

La impactul fasciculului laser cu materialul probei, energia radiațiilor se transformă în energie termică care se propagă în material, modificând starea termică a acestuia. Un interes deosebit îl prezintă valoarea vitezelor de încălzire laser și de răcire ulterioară a materialelor metalice, evaluarea gradientilor de temperatură, a distribuției tensiunilor termice ș.a.m.d. Spre deosebire de cazurile obișnuite, pulsurile laser pot debita energii ridicate într-un timp foarte scurt, pe o zonă extrem de redusă. Acest fapt complică condițiile la limită (în pata focală materialul se poate topi și vaporiza, poate intra în reacție chimică cu atmosfera înconjurătoare, își poate modifica absorbivitatea etc.) iar, pe de altă parte, pentru pulsuri ultrascurte și gradienti mari, însăși noțiunea de temperatură își poate pierde sensul.

Pentru metale, care prezintă o importanță deosebită în prelucrările cu laser, absorbția energiei laser se face, în general, prin efect fotoelectric, electronii fiind trecuți din banda fundamentală în banda de conducție. Pentru un metal, timpul liber mijlociu între ciocnirile electronilor este de ordinul a $10^{-14} \dots 10^{-15}$ s și atunci, pentru intervalele de timp mai mari decât 10^{-9} s, electronii au tot timpul să se termalizeze între ei sau cu fononii rețelei și în acest fel, energia absorbită de electroni să fie transferată în corp. Rezultă că pentru pulsuri laser de durate mai mari sau de ordinul nanosecundelor, energia termică este transferată instantaneu în interiorul volumului corpului în care are loc absorbția. În continuare, deoarece aceleași procese de ciocnire guvernează transferul de căldură, distribuția finală de energie se realizează suficient de rapid pentru ca echilibrul local să apară și atunci se poate utiliza teoria clasică a transferului de căldură. Evoluția temporală a distribuției temperaturii într-un sistem este legată de transferul fluxurilor de căldură de la regiunile mai calde spre regiunile mai reci. Mecanismele care fac posibil transferul de căldură sunt: conducția (căldura se propagă direct prin mediu), convecția (propagarea căldurii are loc odată cu mișcarea unor porțiuni din mediu) și radiația (în care căldura trebuie privită ca o formă de propagare a energiei

electromagnetice). În cazul iradierii laser a metalelor, ținta o constituie un solid și, în consecință, efectele termice sunt legate, în principal, de conducție. Mai mult, chiar la schimbările de fază, în cazul apariției unei pelicule lichide, datorită timpului relativ scurt de încălzire și a dimensiunilor geometrice foarte reduse, conductibilitatea termică prin convecție este nesemnificativă. La temperaturi foarte ridicate ale suprafeței, la care se poate ajunge în unele cazuri practice, trebuie considerate și pierderile de energie prin radiație, care devin semnificative.

Ecuția clasică a transferului de căldură pentru un solid tridimensional, omogen și izotrop, supus acțiunii radiației laser este:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \cdot \Delta T + A_v I(r, t), \quad (3.26)$$

unde c , ρ și k_T sunt căldura specifică, densitatea masică și respectiv, conductivitatea termică a metalului, iar A_v este cantitatea de căldură absorbită de solid în unitatea de timp și de volum.

$I(r, t)$ descrie distribuția spațio-temporală a intensității fasciculului laser (sursa de căldură). Ecuția (3.26) poate fi utilizată și după încheierea încălzirii laser prin eliminarea corespunzătoare al termenului al doilea din membrul drept, numit termen sursă.

Datorită variației cu temperatura a parametrilor termofizici ai metalului, ecuația (3.26) este neliniară, soluțiile analitice fiind accesibile numai într-un număr limitat de cazuri. Totuși, în multe cazuri de interes practic, variațiile cu temperatura a acestor parametri nu sunt prea mari, ele putând fi, într-o primă aproximație, neglijate. Cum absorbția radiației laser pe suprafața probelor metalice înalt prelucrate și curate este redusă, iar stratul pelicular de absorbție a radiației în metal are o grosime de ordinul fracțiunilor de μm , în vizibil coborând până la câțiva \AA , rezultă că absorbția este, în general, un proces de suprafață. Spotul laser se poate considera o sursă de încălzire de suprafață, iar adâncimea de absorbție optică se poate neglija.

Pentru estimări rapide, dar grosiere ale ordinului de mărime al creșterii temperaturii, ca efect al iradierii laser, cu un puls de durată τ_p , se poate utiliza relația:

$$\Delta T \cong \frac{AE_0}{\rho c V}.$$

unde E_0 este energia pulsului laser, ρ și c sunt densitatea și respectiv căldura specifică a metalului, iar V este volumul încălzit, $V \approx \frac{\pi}{4} D_s^2 \sqrt{\chi_T \tau_p}$, D_s fiind diametrul spotului laser pe țintă și χ_T difuzivitatea termică.

Rezolvarea ecuației căldurii (3.26) pentru diversele cazuri de interes conduce la următoarele rezultate în cazul aproximației liniare:

I. Țintă metalică semiinfinită

Această aproximație de solid semiinfinit se aplică atunci când $h \gg D_s \gg l_{th}$, unde h este grosimea probei metalice, D_s este diametrul spotului laser,

$l_{th} = \frac{1}{2} \sqrt{\pi \tau_p \chi_T}$ este adâncimea de difuzie termică, τ_p este durată pulsului laser, iar

χ_T este difuzivitatea termică, $\left(\chi_T = \frac{k_T}{\rho c} \right)$.

1. Spot laser extins

Spotul laser se consideră extins atunci când dimensiunea caracteristică a zonei metalice încălzite laser este mult mai mare decât adâncimea de difuzie termică, $D_s \gg l_{th}$.

a. Sursa constantă în timp

Dacă intensitatea radiației laser incidente este constantă în timp, $I(t)=I_0$, atunci soluția ecuației (3.26) este:

$$T(z, t) = \frac{2A_i0}{k_T} \sqrt{\chi_T t} \cdot \text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\chi_T t}}. \quad (3.27)$$

Expresiile erf și ierfc reprezintă funcțiile normale de distribuție a erorilor lui Gauss și respectiv integrala acestora:

$$\text{erfx} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-m^2} dm, \quad (3.28)$$

$$\text{ierfcx} = \int_0^{\infty} \text{erfcudu} = \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} - x \text{erfcx}, \quad (3.29)$$

$$\text{erfcx} = 1 - \text{erfx} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-m^2} dx. \quad (3.30)$$

Pe suprafață, $z=0$ și din ecuația (3.27), se obține:

$$T(0, t) = \frac{2A_i0}{k_T} \sqrt{\chi_T t}. \quad (3.31)$$

Se observă că ar trebui ca temperatura pe suprafața probei să crească nelimitat pentru durate de încălzire foarte mari, lucru care nu se întâmplă în practică datorită pierderilor radiative care cresc cu temperatura ce se atinge pe suprafață.

b. Sursă variabilă în timp

Când intensitatea radiației laser incidente este uniformă pe suprafața probei, dar, temporar, variază arbitrar, soluția ecuației (3.27) este:

$$T(z, t) = \frac{A\sqrt{\chi_T}}{k_T\sqrt{\pi}} \int_0^t I(t-\xi) e^{-\frac{z^2}{4\xi\chi_T}} \cdot \xi^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (3.32)$$

Corespunzător pe suprafață ($z=0$) rezultă:

$$T(0, t) = \frac{A}{k_T} \sqrt{\frac{\chi_T}{\pi}} \int_0^t I(t-\xi) \xi^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (3.33)$$

Pentru puls temporal dreptunghiular de forma $I(t)=I_0$ în intervalul $0 \leq t \leq \tau_p$ și $I(t)=0$ pentru $t > \tau_p$, se obține soluția (3.31) pentru durata de acțiune a pulsului laser, precum și:

$$T(z, t) = \frac{2AI_0}{k_T} \sqrt{\chi_T} \left\{ \sqrt{t} \cdot \text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\chi_T t}} - \sqrt{t-\tau_p} \cdot \text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\chi_T(t-\tau_p)}} \right\}, \quad (3.34)$$

pentru $t > \tau_p$.

Pentru un puls temporal liniar crescător sau descrescător, de forma $I_c(t) = \frac{tI_0}{\tau_p}$ și respectiv $I_d(t) = I_0 \left(1 - \frac{t}{\tau_p}\right)$ în intervalul $0 \leq t \leq \tau_p$, $I_{c,d}(t) = 0$ pentru $t > \tau_p$, pentru durata de acțiune a pulsului laser, se obține:

$$T_C(z, t) = \frac{AI_0}{\tau_p k_T} \sqrt{\frac{\chi_T}{\pi}} \int_0^t (t - \xi) e^{-\frac{z^2}{4\xi\chi_T}} \cdot \xi^{-\frac{1}{2}} d\xi \quad (3.35)$$

și respectiv,

$$T_d(z, t) = \frac{AI_0}{k_T} \sqrt{\frac{\chi_T}{\pi}} \int_0^t \left(1 - \frac{t - \xi}{\tau_p}\right) e^{-\frac{z^2}{4\xi\chi_T}} \cdot \xi^{-\frac{1}{2}} d\xi. \quad (3.36)$$

Pe suprafața probei, pentru $z = 0$ rezultă:

$$T_C(0, t) = \frac{4AI_0 t^{\frac{3}{2}}}{3\tau_p \sqrt{\pi c_p k_T}} \quad (3.37)$$

și:

$$T_C(0, t) = AI_0 \left(2 - \frac{4f}{3\tau_p}\right) \sqrt{\frac{t}{\pi c_p k_T}}. \quad (3.38)$$

În calcule, pulsurile de forma rampei crescătoare sau descrescătoare se pot aproxima prin pulsuri dreptunghiulare de intensitate $I(t) = I_0$ și de durată $t_p \approx \tau_p/2$.

Temperatura finală ce se obține în acest caz pe suprafața probei diferă cu $\approx 5\%$ față de cazul rampei crescătoare și este mai mare cu $\approx 50\%$ decât în cazul rampei descrescătoare.

Pentru un puls temporal gaussian:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{(t-t_1)^2}{t_0^2}} \quad (3.39)$$

pe suprafața probei, temperatura se determină din soluția (3.34). Cu schimbarea de variabilă $u = \frac{\xi}{t_0}$ rezultă:

$$T(0, t) = AI_0 \sqrt{\frac{t_0}{\pi c_p k_T}} \int_0^{\frac{t}{t_0}} u \frac{1}{2} e^{-\left(u - \frac{t-t_1}{t_0}\right)^2} du. \quad (3.40)$$

Aproximarea pulsului temporal gaussian printr-un puls dreptunghiular de intensitate $I(t) = I_0$ și de durată $\tau_p \approx 1,67t_0$ conduce la o supraestimare a temperaturii maxime pe suprafață cu 20%.

2. Spot laser finit

În condiții de focalizare a fasciculului laser, pentru obținerea unor valori suficient de ridicate ale intensității radiației, de multe ori nu este verificată inegalitatea $D_s \gg l_{th}$ și atunci, pentru $D_s < l_{th}$ și $D_s \geq l_{th}$, se utilizează aproximația spotului laser finit.

a) Sursă de încălzire uniformă spațial

Pentru o intensitate a radiației laser cu o distribuție spațială uniformă de forma: $I() = 4P / (\pi D_s^2)$, unde P este puterea laser incidentă, există următoarele două cazuri:

- Sursa constantă în timp. $I(t) = I()$, și atunci ecuația (3.27) are, în coordonate cilindrice, soluția:

$$T(r, z, t) = \frac{I_0 A D_S}{4k_T} \int_0^\infty \mathfrak{S}_0(\xi r) \mathfrak{S}_1\left(\xi \frac{D_S}{2}\right) \left\{ e^{-\xi z} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\chi_T t}} - \xi\sqrt{\chi_T t}\right] - e^{\xi z} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\chi_T t}} + \xi\sqrt{\chi_T t}\right] \right\} \frac{d\xi}{\xi} \quad (3.41)$$

unde \mathfrak{S}_0 și \mathfrak{S}_1 sunt funcțiile Bessel de speța întâi de indice zero și respectiv unu.

– Sursă variabilă în timp

Ecuția (3.27) retranscrisă în coordonate cilindrice are soluția:

$$T(r, z, t) = \frac{1}{4\rho c\sqrt{\pi^3}\sqrt{\chi_T}} \int_0^{D_S/2} \int_0^t \frac{I(r', t')}{(t-t')^{3/2}} \mathfrak{S}_0\left[\frac{rr'}{2\chi_T(t-t')}\right] e^{\frac{r^2+r'^2+z^2}{4\chi_T(t-t')}} r' dr' dt \quad (3.42)$$

b) Sursă de încălzire cu variație spațială a intensității

Pentru cazul mai întâlnit în practică, al unei surse de încălzire cu distribuție spațială gaussiană, soluția ecuației (3.27), în coordonate cilindrice, este:

$$T(r, z, t) = \frac{A D_S^2}{4\rho c\sqrt{\pi\chi_T}} \int_0^t \frac{I_0(t') dt'}{\sqrt{t-t'} \left[4\chi_T(t-t') D_S^2 / 4\right]} e^{-\left[\frac{z^2}{4\chi_T(t-t')} - \frac{r^2}{4\chi_T(t-t') + D_S^2/4}\right]} \quad (3.43)$$

unde $I_0(t)$ descrie evoluția temporală a intensității radiației laser incidente în centrul spotului de iradiere.

II Țintă de grosime finită

Această aproximație se utilizează când se focalizează puternic radiația laser pe suprafața unei ținte de grosime relativ mică: $D_s \ll h \ll l_{th}$ sau $D_s \ll l_{th} \cong 2h$.

1. Spot laser extins

a). Sursă uniformă, constantă în timp

Soluția ecuației (3.27) este în acest caz:

$$T(z, t) = \frac{A I_0 t}{\rho c h} + \frac{A I_0 h}{k_T} \left[\frac{3z^2 - h}{6h^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\frac{\chi_T n^2 \pi^2 t^2}{h^2}} \cos \frac{n\pi z}{h} \right] \quad (3.44)$$

unde I_0 este valoarea constantă a intensității radiației laser, h nivelul superior al probei, în care loc iradierea, iar z este adâncimea recurentă la care se calculează în probă temperatura.

b) Sursa cu variație temporală arbitrară

Pentru un puls de forma:

$$I(t) = B_{tm}/2; \quad m = -1, 0, 1, \dots$$

se obține:

$$T(z, t) = \frac{2^{m+1} A I(t) \sqrt{\chi_T t} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)}{k_T} \sum_{n=0}^{\infty} \left[i^{m+1} \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h-z}{2\sqrt{\chi_T t}} + i^{m+1} \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h+z}{2\sqrt{\chi_T t}} \right] \quad (3.45)$$

unde:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$$

2. Spot laser finit

Sursa circulară, constantă în timp

În cazul unui film metalic termic foarte subțire, în ipoteza $h \leq \sqrt{\chi_{\text{T}}t}$, în interiorul cilindrului drept de suprafață $\pi D_{\text{S}}^2/4$ și înălțime h încălzit uniform de radiația laser, evoluția temporală a temperaturii se poate estima din expresia:

$$T(t) \cong \frac{AI_0 D_{\text{S}}^2}{16k_{\text{T}}h} \left[\ln \left(\frac{16\chi_{\text{T}}t}{GD_{\text{S}}^2} \right) + \frac{D_{\text{S}}^2}{8\chi_{\text{T}}t} \ln \left(\frac{16\chi_{\text{T}}t}{GD_{\text{S}}^2} + \frac{D_{\text{S}}^2}{8\chi_{\text{T}}t} \right) \right], \text{ pentru } \frac{D_{\text{S}}^2}{4\chi_{\text{T}}t} \ll 1 \quad (3.46)$$

unde: $G \cong 1,781$ sau din relația:

$$T(t) \cong \frac{AI_0 D_{\text{S}}}{2k_{\text{T}}h} \sqrt{\chi_{\text{T}}t} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{\sqrt{\chi_{\text{T}}t}}{2D_{\text{S}}} \right], \text{ pentru } \frac{D_{\text{S}}^2}{4\chi_{\text{T}}t} \gg 1 \quad (3.47)$$

Pentru un disc metalic, pentru care ipoteza $h \leq \sqrt{\chi_{\text{T}}t}$ nu mai este valabilă, temperatura nu mai este constantă în adâncimea probei și, în centrul spotului de iradiere, se evaluează din expresia:

$$T(z, t) = AI_0 \frac{2\sqrt{\chi_{\text{T}}t}}{k_{\text{T}}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \text{ierfc} \frac{|z - 2nh|}{2\sqrt{\chi_{\text{T}}t}} - \text{ierfc} \frac{\sqrt{(z - 2nh)^2 + \frac{D_{\text{S}}^2}{4}}}{2\sqrt{\chi_{\text{T}}t}} \right\} \quad (3.48)$$

Rezolvarea ecuației (3.27) conduce, în acest caz, la soluția:

$$T(r, t) = \frac{AI_0 \chi_{\text{T}} D_{\text{S}}^2}{4k_{\text{T}}h} \int_0^t \frac{dt'}{4\chi_{\text{T}}t' + \frac{D_{\text{S}}^2}{4}} e^{-\chi_{\text{T}}k_{\text{T}}^2 t' - \frac{r^2}{4\chi_{\text{T}}t'} + \frac{r^2 D_{\text{S}}^2}{16\chi_{\text{T}}t' \left(\frac{D_{\text{S}}^2}{4} + 4\chi_{\text{T}}t' \right)}} \quad (3.49)$$

3.1.3 Considerarea pierderilor radiative

Pierderile de căldură prin radiația emisă de pe suprafața probelor metalice, pe durata sau în urma iradierii laser, sunt deosebit de importante în cazul lamelor și discurilor metalice subțiri, pentru spoturi laser extinse. Pierderile radiative sunt exprimate prin intermediul intensității radiante:

$$I_{\text{r}} = \sigma_0 \sigma_{\text{SB}} (T^4 + T_0^4) + \eta (T - T_0), \quad (3.50)$$

unde σ_{SB} este constanta Stefan - Boltzmann, σ_0 este emisivitatea suprafeței țintei, η este constanta de schimb termic convectiv, iar T_0 este temperatura mediului ambiant. În cazul unidimensional, staționar, soluția ecuației căldurii, în aproximația liniară, este de forma:

$$T = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{2\eta}{\sigma_0 \sigma_{\text{SB}}} \sqrt{x} - x - \sqrt{x}} \right) \quad (3.51)$$

unde:

$$x = \left\{ \frac{1}{2} \frac{\eta^2}{\sigma_0^2 \sigma_{\text{SB}}^2} + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\eta^2}{\sigma_0^2 \sigma_{\text{SB}}^2} \right)^4 + \left(\frac{4a}{3} \right)^3 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} + \left\{ \frac{1}{2} \frac{\eta^2}{\sigma_0^2 \sigma_{\text{SB}}^2} - \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\eta^2}{\sigma_0^2 \sigma_{\text{SB}}^2} \right)^4 + \left(\frac{4a}{3} \right)^3 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (3.52)$$

și:

$$a = T_0^4 + \eta \frac{T_0}{\sigma_{SB}\sigma_0} + \frac{AI_0}{2\sigma_{SB}\sigma_0} (1 - e^{-\alpha h}) \quad (3.53)$$

α fiind coeficientul de absorbție a radiației laser în materialul țintei.

3.2 Topirea superficială

Precizarea condițiilor în care se induce și evoluează topirea superficială a unei probe metalice prezintă atât interes fundamental, cât și direct practic, în legătură cu utilizarea diverselor surse laser în operațiile de procesare tehnologică. Topirea este o metodă de distrugere a suprafețelor, dar este un efect dorit când se efectuează operații de sudură laser. În acest caz, se urmărește topirea unei cantități cât mai mari de substanță, cu evitarea dislocării acesteia prin vaporizare sau prin pulverizare în faza lichidă. Este important de determinat, în aceste condiții, momentul la care se induce topirea superficială a probei și dimensiunile stratului superficial topit.

Estimarea temperaturii cu ajutorul ecuației căldurii este corectă până în momentul în care se ajunge la temperatura de topire. Ulterior atingerii temperaturii de topire, interfața solid-lichid se propagă în adâncimea țintei, în timp ce temperatura în stratul superficial crește rapid peste punctul de topire, T_m .

Considerând o geometrie liniară, pentru o valoare constantă $I(t) = I_0$ a intensității radiației laser, ecuațiile care descriu topirea superficială (neluând în calcul fenomenele de vaporizare și pulverizare de lichid), cu condițiile inițiale și la limită, sunt:

$$k_{T_2} \frac{\partial T_2}{\partial x} - k_{T_1} \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_m \rho \frac{dZ(t)}{dt} \quad (3.54)$$

$$-k_{T_1} \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=0} = AI_0 \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \chi_T^i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}; \quad i = 1, 2 \quad (3.56)$$

$$T_1 = T_2 = T_m; \quad z = Z(t), \quad t > 0, \quad (3.57)$$

$$T_2(z, 0) = T_s(z), \quad (3.58)$$

$$T_2(\infty, t) = 0, \quad (3.59)$$

$$Z(0) = 0. \quad (3.60)$$

În aceste ecuații λ_m reprezintă căldura latentă de topire, indicii 1, 2 specifică pelicula de lichid (metal topit) și respectiv, metalul solid, $Z(t)$ este frontiera metal solid-topitură, iar T_s este temperatura solidului neperturbat. Ecuația (3.54) reprezintă ecuația de mișcare a suprafeței ce delimitează faza lichidă, iar ecuațiile (3.56) reprezintă ecuațiile căldurii pentru faza lichidă ($i = 1$) și faza solidă ($i = 2$).

Sistemul este astfel scris încât $t=0$ reprezintă momentul la care suprafața atinge temperatura T_m , deci condiția (3.58) reprezintă distribuția de temperatură la care a ajuns semispațiul când pe suprafața sa se atinge punctul de topire, care se calculează conform paragrafului anterior.

Momentul de inducere a topirii superficiale se poate estima din relația:

$$t_m = \frac{1}{A} \left[\frac{h(c_p T_m + \lambda_m)}{I_0} - A_1 t_1 \right], \quad (3.61)$$

unde t_m este timpul de iradiere care se scurge până la atingerea punctului de topire într-un strat de grosime h ($h \leq 1 \mu\text{m}$) de pe suprafața probei, iar t_i este timpul care mai este necesar pentru topirea completă a acestui strat. A și A_1 sunt absorbțivitățile materialului în faza solidă și respectiv lichidă.

Pentru o intensitate laser constantă în timp $I(t)=I_0$, în aproximația solidului semiinfinit și pentru un spot laser extins, timpul în care se atinge punctul de topire pe suprafața probei se obține din ecuația (3.61), punând condiția: $T(0, t_m) = T_m$. Rezultă:

$$t_m = \frac{k_T^2 T_m^2}{4A^2 I_0^2}, \quad (3.62)$$

dacă se neglijează variația absorbțivității cu temperatura.

Pe suprafața probei, temperatura este dată de relația:

$$T(0, t) = \left(T_0 + \frac{A_0}{A_1} \right) e^{u^2} (1 + \operatorname{erfu}) - \frac{A_0}{A_1}, \quad (3.63)$$

unde s-a introdus variabila:

$$u = I_0 A_1 \left(\frac{t}{k_T C_V} \right)^{1/2}, \quad (3.64)$$

iar A_1 este absorbțivitatea probei metalice la temperatura T .

Dacă se consideră că punctul de topire, T_m , se atinge pe suprafață la sfârșitul pulsului laser, $t = \tau_p$, adică: $T(0, \tau_p) = T_m$, din expresia (3.63) se obține următoarea ecuație în raport cu valoarea corespunzătoare, u_m , a parametrului u :

$$e^{u_m^2} (1 + \operatorname{erfu}_m) = 1 + \frac{T_m - T_0}{T_0 + \frac{A_0}{A_1}}, \quad (3.65)$$

iar densitatea de energie laser incidentă ce asigură topirea superficială este:

$$w_{em}^m = \frac{u_m (\tau_p k_T C_p)^{1/2}}{A_1}. \quad (3.66)$$

O valoare aproximativă a densității de energie laser, incidentă pe proba metalică, necesară pentru a realiza topirea superficială, se poate calcula cu relația:

$$w_{em}^m = \left(\pi C_p k_T \tau_p \right)^{1/2} \frac{T_m - T_0}{2A_m}, \quad (3.67)$$

unde se consideră o valoare constantă a absorbțivității corespunzând mediei aritmetice pe intervalul cuprins între temperatura ambiantă și punctul de topire:

$$A_m = \frac{1}{2} [A(T_0) + A(T_m)]. \quad (3.68)$$

Adâncimea stratului superficial lichid, care poate fi creat și susținut la suprafața țintelor metalice, sub acțiunea radiației laser de putere, în condițiile evitării eliminării de substanță sub formă de vapori sau lichid, este un parametru esențial pentru operațiile de sudură laser. O sudură laser optimă se obține pentru o grosime maximă a topiturii ce se poate induce pe suprafețele metalice evitând orice dislocare de material.

Numeroase studii experimentale au constatat dificultatea și câteodată chiar imposibilitatea precizării adâncimii până la care a fost topită o anumită zonă de pe suprafața unei probe metalice. În aceste situații a fost dificil chiar să se precizeze dacă metalul a fost topit.

Teoretic pentru determinarea adâncimii Z_m a stratului topit, se pune condiția ca la adâncimea Z_m temperatura să aibă valoarea T_m , iar la suprafața probei temperatura să atingă punctul de fierbere, T_v . În limita neglijării variației absorbivității cu temperatura, pentru o distribuție spațială gaussiană a intensității radiației laser și efectuând calculele pentru centrul spotului de iradiere, se pot stabili următoarele expresii analitice ale adâncimii de topire:

$$Z_m = \frac{1,2k_T}{AI_0} T_M \left(\frac{T_v}{T_m} - 1 \right), \quad (3.69)$$

în cazul când spotul laser acoperă întreaga suprafață a probei iradiate și

$$Z_m = \frac{D_S}{4} \left(\frac{T_v}{T_m} - \frac{T_m}{T_v} \right), \quad (3.70)$$

pentru un spot circular de diametru D_s și pentru timpi mari de iradiere.

Pentru stabilirea lățimii topiturii, se pune condiția ca în centrul spotului de iradiere temperatura să atingă valoarea T_v , iar la marginea zonei topite temperatura să aibă valoarea T_m . Experiențele au arătat că extremitatea topiturii se poate situa atât în interiorul cât și în afara spotului de iradiere.

La topirea locală laser a metalelor, întrucât există un raport mare între aria suprafeței de separație și volumul topiturii (de obicei peste 10), solidificarea materialului este determinată în primul rând de conducția căldurii în faza solidă (care se află la temperatura ambiantă). Răcirea materialului are loc rapid și uniform, începând din apropierea interfeței lichid-solid, aflată la adâncimea cea mai mare a fazei lichide. În urma solidificării, microstructurile formate se compun din constituenți metalografici fini în zona de început a solidificării, cu efecte favorabile pentru procesele de prelucrare cu laser, când interesează modificarea structurii materialului (tratamente termice, alieri de suprafață etc).

3.3 Vaporizarea

Continuând încălzirea regiunii topite, corpul ajunge la punctul de fierbere și o parte din material este îndepărtată prin vaporizare. Pentru viteze mari de încălzire transformarea se face în volum, având loc fierberea sau direct sublimarea materialului. Uneori, pentru pulsuri laser de intensități mari și durate scurte, procesul de vaporizare laser este însoțit și de o împrăștiere a peliculei lichide sau chiar a unor fragmente solide.

În cazul pulsurilor laser cu durate mai mari ($\tau_p \geq n_s$) și la intensități nu prea ridicate, vaporizarea urmează topirii și se realizează superficial după ce punctul de fierbere a fost atins. Tratarea acestei situații este dificilă chiar și în cazul celor mai simple geometrii (semispațiu iradiat uniform), deoarece trebuie rezolvate simultan trei ecuații ale căldurii pentru fiecare fază în parte – solidă, lichidă și gazoasă - cu două frontiere mobile. Instalarea regimului vaporizării se caracterizează printr-o valoare de prag a intensității laser I_V , specifică metalului. Pentru intensități superioare acestei valori, disiparea căldurii într-un strat superficial de material are loc atât de repede încât provoacă vaporizarea acestuia înainte ca procesul de conducție termică să transfere o cantitate semnificativă de căldură spre interiorul țintei.

Pentru aplicații, este utilă cunoașterea intensității de prag pentru inducerea vaporizării, timpul după care suprafața iradiată atinge punctul de vaporizare, adâncimea și eventual forma craterului care se obține prin evaporare.

O relație care permite calculul intensității de prag pentru inducerea vaporizării este:

$$I_V \cong \frac{\lambda_V \cdot \rho}{1 - R} \sqrt{\frac{\chi_T}{\tau_p}}, \quad (3.71)$$

unde λ_V este căldura latentă de vaporizare pe atom gram, ρ este densitatea materialului în faza solidă, R este reflectivitatea suprafeței țintei la radiația laser, χ_T este difuzivitatea termică, iar τ_p este durata pulsului laser. Înlocuirile numerice pentru diferite metale conduc la valori ale intensității de prag de ordinul a 10⁶-10⁷ W/cm². Acestea coincid cu valorile obținute experimental pentru intensitățile de prag ale majorității metalelor în domeniile $\tau_p \sim 1-10 \mu_s$, $\chi_T = 0,05-0,75 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, pentru pete de iradiere cu raza $R_s \sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ m}$ și considerând un coeficient de absorbție al radiației laser în substanța țintei $a \sim 10^6 - 10^7 \text{ m}^{-1}$.

O expresie aproximativă a timpului după care pe suprafața iradiată se atinge punctul de vaporizare, în funcție de intensitatea radiației laser incidente și de parametrii termofizici ai materialului, se poate stabili printr-o analiză unidimensională a vaporizării cvasistaționare și se obține:

$$\tau_V \sim \frac{\pi \chi_T \rho C}{4 I_0^2} (T_V - T_0)^2, \quad (3.72)$$

unde T_V este temperatura de vaporizare a materialului țintei.

O expresie a densității de energie laser incidentă pe proba metalică necesară pentru a induce vaporizarea, w_{em}^V , se poate stabili în condițiile în care se neglijează: (i) expansiunea vaporilor; (ii) creșterea punctului de evaporare și alte efecte generate de presiunea înaltă de recul; (iii) timpul necesar topirii unui strat de suprafață cu o grosime de ordinul adâncimii caracteristice de absorbție optică ($\sim 10 \text{ nm}$). Rezultă relația:

$$w_{em}^V = w_{em}^m \sqrt{\frac{t_m}{\tau_p}} + (T_V - T_m) \frac{\sqrt{\pi k_T C_1 (\tau_p - t_m)}}{2 A_l} + \frac{\lambda_V \sqrt{\frac{\pi k_l (\tau_p - t_m)}{4 C_l}}}{A_l}, \quad (3.73)$$

în care w_{em}^V este densitatea de energie incidentă laser necesară inducerii topirii superficiale, $t_m < \tau_p$ este timpul de inducere a topirii superficiale, τ_p este durata pulsului laser, C_l este capacitatea calorică a metalului în faza lichidă, λ_V este căldura latentă de vaporizare, A_l este absorbivitatea materialului țintei în fază lichidă k_T și k_l sunt conductivitatea termică a metalului în faza solidă și respectiv, în faza lichidă, iar T'_m reprezintă distribuția de temperatură în probă după inițierea topirii acesteia.

Pentru a estima adâncimea craterului care se obține prin vaporizare se presupune - în primă aproximație - că materialul nu constituie un strat absorbant și că grosimea fazei lichide este neglijabilă, dar se ține seama de căldura latentă de topire.

În aceste condiții, se obține următoarea expresie pentru viteza frontului de vaporizare:

$$v_S = \frac{dz_S}{dt} \cong \frac{(1 - R) I_0}{\rho [\lambda_V + \lambda_m + C_l (T_V - T_m)]}. \quad (3.74)$$

Adâncimea până la care materialul este evaporat la un moment dat t se poate evalua din relația:

$$z_S \cong v_S (t - \tau_V). \quad (3.75)$$

Aproximațiile considerate în cadrul modelului sunt corecte atâta timp cât este satisfăcută relația:

$$z_S \gg \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} \left[1 + \frac{1}{C_l(T_V - T_m)} \right]^{-1} \right\} \frac{k_T(T_V - T_m)}{(1-R)I_0}. \quad (3.76)$$

În cazul unui puls laser cu evoluție temporală variabilă, adâncimea craterului se determină din relația:

$$z_S = \int_0^t \frac{I(t)dt}{\rho[\lambda_V + \lambda_m + C_l(T_V - T_m)]}, \quad (3.77)$$

care, în aproximația constantelor de material ρ și C_l independente de temperatură, devine:

$$z_S = \frac{1}{\rho[\lambda_V + \lambda_m + C_l(T_V - T_m)]} \int_0^t I(t)dt. \quad (3.78)$$

O estimare rapidă a ordinului de mărime a grosimii stratului superficial din care se produce vaporizarea se poate face cu ajutorul relației:

$$z_S \sim \frac{\chi T}{v_S}. \quad (3.79)$$

Dacă singurul mecanism care conduce la expulzarea de substanță ar fi vaporizarea, atunci adâncimea craterului creat ar fi direct proporțională cu intensitatea radiației incidente. Experimental, această dependență nu se verifică, iar comportarea $z_s(I)$ este mai complicată deoarece, la formarea craterului, alături de expulzarea vaporilor contribuie un al doilea mecanism: pulverizarea de metal lichid din zona iradiată, sub acțiunea unui gradient de presiune creat de vapori, distribuit pe suprafața țintei și direcționat de la centrul craterului spre periferia acestuia.

Temperatura stratului din care are loc vaporizarea $T(I) > T_V$ este determinată de raportul între puterea laser absorbită și viteza de disipare a energiei în procesul de vaporizare. Din această cauză expresiei (3.75) trebuie să i se asocieze o relație care să lege fluxul de substanță evacuată de pe suprafața țintei, $j \sim v_S \rho$, de temperatură. Aceasta relație se poate considera expresia fluxului de vaporizare în vid:

$$j_v \cong \sqrt{\frac{m_a}{2\pi T}} \cdot p_v^S(T), \quad (3.80)$$

unde m_a este masa atomică a metalului, iar $p_v^S(T)$ este presiunea vaporilor saturați la temperatura T . Relația este obținută considerând că nu există un flux invers de particule vaporizate, direcționat spre suprafața țintei. În realitate, acest flux invers de particule este totdeauna prezent și, pentru metale, el reprezintă aproximativ 18 % din fluxul direct. Rezultă că $j \cong 0,82 j_v$ și din relațiile (3.75) și (3.80) se obține următoarea ecuație implicită pentru determinarea temperaturii stratului din care are loc vaporizarea:

$$\frac{(1-R)I_0}{\lambda_V + \lambda_m + C_l(T_V - T_m)} = 0,82 \sqrt{\frac{m_a}{2\pi T}} \cdot p_v^S(T). \quad (3.81)$$

Dependența $p_v^S(T)$ se poate preciza din considerente termodinamice și se obține:

$$p_v^S(T) = p_0 e^{\frac{\lambda_{Vv}}{T_V} - \frac{\lambda_{Vv}}{T}}. \quad (3.82)$$

În cazul vaporizării laser în vid, se produce o ecranare semnificativă a țintei într-o zonă limitrofă acesteia, cu o dimensiune caracteristică aproximativ egală cu raza spotului laser, R_s . Această ecranare a suprafeței care se vaporizează apare la valori ale intensității radiației laser incidente mai mici decât cele care corespund pragului de generare a plasmelor staționare, chiar dacă se ține seama de răcirea vaporilor ca efect al expansiunii în vid.

Impulsul de recul imprimat țintei, P_r și cantitatea de substanță expulzată de pe suprafața țintelor, Δm , supuse vaporizării laser, sunt mărimi accesibile de obținut experimental. De regulă, se determină valorile specifice ale acestor mărimi: P_r/E_0 și $\Delta m/E_0$, unde E_0 este energia totală în pulsul laser. Se pornește de la relațiile:

$$P_r = \frac{p_v^s}{2} \cdot \pi R_s^2 \cdot \tau_p \text{ și } \Delta m = 0,82 \cdot j_v \pi R_s^2 \tau_p, \text{ rezultând:}$$

$$\frac{P_r}{E_0} \cong (1 - R) \frac{e^{-g_v}}{\lambda_v} \cdot \sqrt{\frac{\pi m_a T}{2}} \quad (3.83)$$

și

$$\frac{\Delta m}{E_0} \cong (1 - R) e^{-g_v} \frac{m_a}{\lambda_v}. \quad (3.84)$$

Există o valoare a intensității laser pentru care aceste mărimi specifice au o valoare maximă, după care are loc o scădere care se explică prin faptul că cea mai mare parte din energia laser incidentă pe suprafața țintei se cheltuiește pentru încălzirea metalului în profunzime și nu pentru susținerea procesului de vaporizare.

Experiențele arată că într-o zonă vecină cu suprafața țintei, până la distanțe de ordinul razei petei focale, expansiunea vaporilor se face pe direcția fasciculului laser cu viteză locală a sunetului. Ulterior, valoarea relativ mare a presiunii pe frontul de expansiune provoacă lărgirea adiabatică în mediul ambiant, expansiunea devine tridimensională, iar viteza mișcării supersonică.

Un fenomen fizic specific care apare la vaporizarea superficială laser îl constituie scăderea conductivității electrice a metalului și a celorlalte proprietăți legate de ea. Prin micșorarea densității sub o valoare limită ρ_{lim} , conductivitatea electrică scade brusc cu câteva ordine de mărime și metalul lichid se transformă în dielectric lichid. Valorile de prag ale intensității radiației laser incidente ce induc pe suprafața țintei tranziția metal lichid - dielectric lichid se situează, pentru majoritatea metalelor, în domeniul 107 - 108 W/cm². Dacă se notează cu I_{md} intensitatea radiației laser la care apare tranziția metal lichid - dielectric lichid și dacă I_v este intensitatea radiației laser incidente la care debutează procesul de vaporizare, atunci pot exista următoarele două cazuri: (i) pentru intensități ale radiației laser incidente pe țintă cuprinse în intervalul $I_v < I < I_{md}$, substanța care se vaporizează se găsește în starea de metal lichid; (ii) pentru intensități ale radiației laser incidente $I > I_{md}$, materialul devine dielectric lichid. În acest caz, ca urmare a scăderii absorbției în materialul topit, temperatura suprafeței țintei nu mai crește semnificativ peste o valoare T_{md} a temperaturii caracteristice metalului. Surplusul energetic, corespunzând saltului intensității incidente peste I_{md} , revine susținerii înaintării în adâncimea țintei a unei unde care asigură topirea, încălzirea metalului lichid, trecerea lui în starea de dielectric topit și eventuala sa încălzire ulterioară. Frontul acestei unde, numită "de transparentă", se distanțează, în aceste condiții de iradiere, de cel al unde de vaporizare care separă dielectricul lichid de vapori.

3.4 Concluzii. Contribuții personale

Capitolul al treilea al tezei prezintă descriptiv și analitic fenomenele termice specifice interacțiunii structurilor materiale cu radiația laser. Studiul vizează în special metalele, pentru a căror tăiere sau sudare s-au dezvoltat tehnologii neconvenționale bazate pe acțiunea laserilor.

Procesele care se manifestă la incidența unui fascicul laser pe o suprafață includ încălzirea până la topire, vaporizare sau sublimare și depind de natura materialului, respectiv de proprietățile acestuia, dintre care cea mai semnificativă este absorbivitatea și de caracteristicile fasciculului laser, printre care cele determinante sunt lungimea de undă dominantă, puterea și regimul continuu sau în impulsuri de emisie.

Aspectele calitative ale fenomenelor sunt însoțite de tratări analitice susținute de ecuațiile transferului de căldură, formulate pe raționamente având la bază bilanțuri energetice.

Astfel, se demonstrează că la iluminarea unei suprafețe solide cu impulsuri laser suficient de intense și de durate corespunzător de scurte, se obține nu numai topirea, ci direct sublimarea primelor straturi atomice ale suprafeței. Dacă intensitatea radiației depășește o valoare de prag, caracteristică materialului iradiat, topirea și vaporizarea sau sublimarea se fac cu cheltuieli mici în bilanțul energetic.

Sub acțiunea radiației laser pe suprafața țintelor, succesiv sau uneori simultan, au loc următoarele procese: încălzirea și topirea, evacuarea de material în faza lichidă și gazoasă, încălzirea și ionizarea materialului evacuat, încălzirea și detenta plasmelor produse.

Pentru o valoare a intensității laser mică, în materiale se instaurează regimul de topire superficială. O undă de încălzire se propagă în adâncimea materialului, iar pe suprafața acestuia se produce topirea. Efectele provocate pe suprafața probelor sunt determinate de conductivitatea termică a fazei solide și sunt limitate la transformări morfologice superficiale ale rețelei cristaline, la inducerea unei dislocări și la apariția de incluziuni. La asemenea valori ale intensității radiației laser, cantitatea de substanță (electroni și ioni) evacuată de pe suprafața probei este nesemnificativă.

Pentru valori mari ale intensității laser, cheltuielile energetice pentru încălzirea, topirea și vaporizarea metalului devin neglijabile față de cele pentru ionizare și încălzirea plasmelor create. În aceste condiții se instaurează regimul generării și încălzirii plasmelor.

Durata pulsului laser este un parametru cu o variație largă între diferitele experimente, influențând grosimea stratului încălzit de fasciculul laser.

Toate cele trei praguri de distrugere a suprafețelor prin topire, vaporizare sau generare de plasmă, depind în același mod de durata pulsului laser ($\sim \sqrt{\tau_p}$).

Contribuțiile personale din prezentul capitol pot fi formulate astfel:

- selecția dintr-un material complex, interdisciplinar și cu caracter fundamental, care necesită corelarea unor concepte și legi ale termodinamicii, opticii, fizicii și chimiei, a secvențelor utile pentru dezvoltarea ulterioară în teză a aplicației concrete studiate și anume tăierea metalelor prin tehnologia neconvențională bazată pe interacțiunea fasciculelor laser cu structurile metalice
- identificarea factorilor de material și a parametrilor optici, geometrici și energetici ai laserilor, care permit tăierea metalelor cu fascicule laser și care influențează desfășurarea și rezultatele procesului de tăiere

- prezentarea detaliată a suportului teoretic de caracterizare a transferului de căldură, astfel încât să poată fi explicate și, consecutiv, controlate fenomenele de încălzire superficială și în masă a materialului iradiat, precum și efectele încălzirii (topire, vaporizare, sublimare, expulzare mecanică a unor fragmente materiale, izolarea fenomenelor termic active în zona petei de focalizare a fasciculului, modificările structurale din vecinătatea conturului de prelucrare etc.)
- particularizarea ecuației clasice de transfer termic pentru un corp material tridimensional, omogen și izotrop pentru o serie de cazuri specifice zonei de interacțiune structură materială – laser (spot laser extins și spot laser finit, cu principalele subcazuri: sursă continuă și sursă variabilă în timp, respectiv cu impulsuri modelate matematic în diverse formule – puls dreptunghiular, liniar crescător sau descrescător și gaussian); particularizările vizează atât suprafața unor structuri materiale groase – teoretic semiinfinite, precum și suprafața unor medii materiale subțiri în interacțiune cu fascicule laser.

[B1] [B3] [C1] [C11] [D1] [D5] [D6] [D7] [H3] [H4] [H5] [J1] [K2] [L1] [M2] [P1]
[P5] [R1] [S5] [S9] [U1] [W1] [Z2] [***]

4. PARTICULARITĂȚI ALE PRELUCRĂRILOR MECANICE BAZATE PE TEHNOLOGII LASER

4.1 Influența aberațiilor asupra geometriei fascicului emergent respectiv asupra distribuției energetice

4.1.1 Considerații privind aberațiile sistemelor optice

Reprezentarea optică ideală implică satisfacerea condițiilor de stigmatism, planeitate și ortoscopie. Relațiile de calcul specifice reprezentării colimare sunt valabile numai pentru domeniul paraxial.

Un sistem optic real este caracterizat prin reprezentări asociate cu aberații geometrice, cromatice și de undă.

Aberațiile geometrice specifice și radiațiilor monocromatice pot fi regăsite într-o reprezentare optică sub forma aberațiilor de deschidere, a comei, astigmatismului, curburii câmpului și distorsiunii.

Laserului - radiație monocromatică sub formă de fascicul paralel cu deschidere finită - îi este proprie, cu precădere, aberația de deschidere sau de sfericitate. Celelalte aberații pot fi neglijate.

Se presupune un fascicul laser, paralel, în interacțiune cu o lentilă convergentă (fig. 4.1).

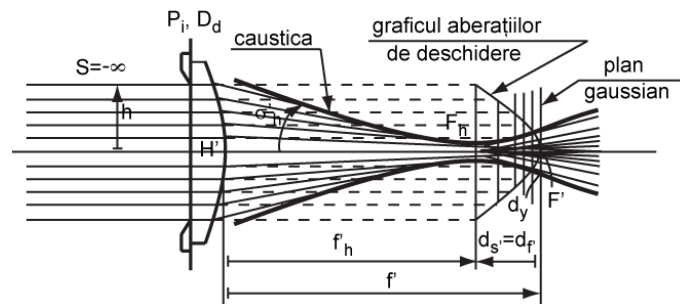


Fig. 4.1 Interacțiunea fascicului laser cu o lentilă convergentă

Urmărind traseele razelor emergente provenite de la un fascicul incident paralel, se constată că:

- imaginea unui punct de la infinit nu este un singur punct F' ci o zonă pe axa optică, delimitată de un punct F' aparținând planului gaussian și un punct F_h' aparținând planului imagine corespunzător deschiderii maxime
- razele marginale se refractă mai aproape de lentilă.

Înfășurătoarea familiei de raze emergente reprezintă o curbă numită caustică - având vârful în planul gaussian.

Deplasând un ecran în zona corespunzătoare aberației de deschidere de la F' spre F_h' se constată că nu există nici o poziție a ecranului în care să se obțină o imagine punctiformă pentru un punct (sau sursă) de la infinit.

Expresia

$$ds' = ds'_h = s'_h - s', \quad (4.1)$$

definește aberația de deschidere axială sau longitudinală. Dacă fasciculul este paralel atunci ds' exprimă variația poziției focarului imagine:

$$ds' = df'.$$

Planului gaussian i se asociază și aberația de deschidere transversală sau de mărire:

$$dy' = dy_h = ds'_h \cdot \operatorname{tg} \sigma'_h. \quad (4.2)$$

Aberația transversală se manifestă printr-un cerc de difuzie de o anumită rază. Intensitatea luminoasă și raza cercului de difuzie variază pe ecran cu poziția punctului.

Aceste caracteristici pot avea impact hotărâtor asupra parametrilor procesului de prelucrare cu laseri.

4.1.2 Impactul aberațiilor asupra focalizării fasciculului laser

În cazul laserilor folosiți pentru prelucrări mecanice devin foarte importante posibilitățile de focalizare a fasciculului, respectiv concentrarea de energie a radiației laser în zona de prelucrare.

În analiza caracteristicilor de focalizare se apelează la două modele:

1. Radiația laser este considerată un fascicul paralel iar sistemul optic de focalizare ideal. Conform principiilor opticii geometrice fasciculul în spațiul imagine al sistemului optic se va concentra în focarul F' . În consecință în focar ar rezulta o densitate infinit de mare de energie - situație neconfirmată în realitate.
2. Se admite că fasciculul este paralel, sistemul optic ideal, dar se ia în considerare și fenomenul de difracție provocat de trecerea fasciculului prin diafragma de deschidere (apertură). Ca urmare, în mediul exterior fasciculul nu va mai fi absolut paralel ci va deveni ușor divergent, unghiul de difracție ϕ fiind proporțional cu λ/D (D - diametrul diafragmei de apertură) - (fig. 4.2).

În planul focal se formează o figură de difracție. În cazul unei diafragme cu deschidere circulară figura de difracție va prezenta o zonă luminoasă concentrată înconjurată de franje de intensități tot mai reduse.

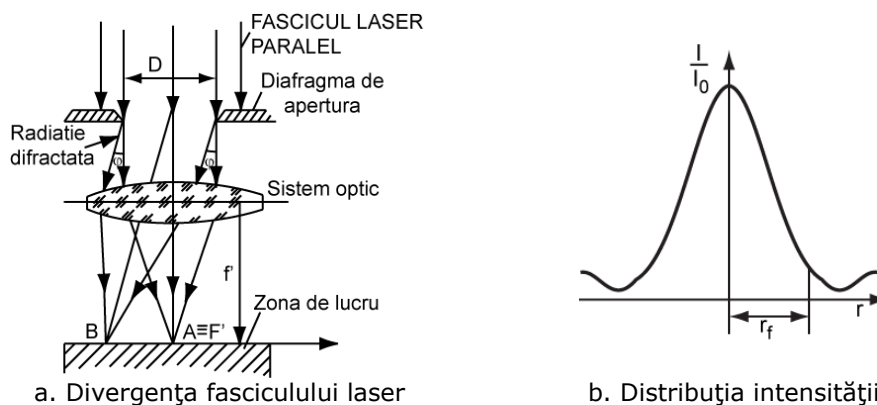


Fig. 4.2 Distribuția fasciculului laser și distribuția intensității

Se poate arăta că cea mai mare parte a energiei fascicului laser care traversează diafragma de apertură se află în fasciculul de divergență

$$\theta = 2\phi \cup \phi = 1,22 \frac{\lambda}{D} [\text{rad}]. \quad (4.3)$$

În planul focal, raza fascicului divergent este

$$r_f = AB = f' \cdot \phi = 1,22 \frac{f' \lambda}{D}, \quad (4.4)$$

aceasta reprezentând dimensiunea minimă a focalizării (limita de difracție după criteriul lui Rayleigh).

Fasciculul laser generează prin focalizare un spot cu diametrul minim dat de relația (diametrul cercului Airy):

$$2r_f = 2,44 \frac{f' \lambda}{D}, \quad (4.5)$$

ceea ce impune concluzia că densitatea de energie în focar are o valoare finită.

Distribuția intensității de difracție este redată în fig. 4.2 b, unde I_0 este intensitatea fascicului pe axa optică în planul gaussian iar I - intensitatea într-un punct oarecare situat la distanța r de centrul spotului.

Zona pentru care $r > r_f$ nu este semnificativă din punct de vedere energetic.

Pentru un laser cu CO_2 ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) și diametrul fascicului $D = 10 \text{ mm}$ rezultă diametrul cercului Airy $2r_f = 0,129 \text{ mm}$.

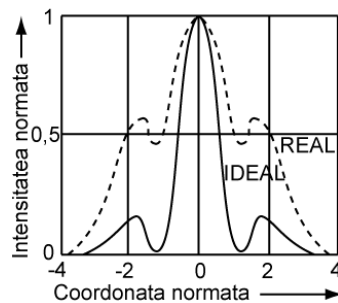
4.1.3 Distribuția intensității în fasciculul laser

În analiza distribuției intensității în fasciculul laser rezonatorul poate fi considerat ideal (când se neglijează influența mediului activ asupra configurației câmpului) sau real (caz în care nu se poate neglija influența mediului amplificator).

În primul caz configurațiile câmpului electromagnetic (moduri ideale) sunt descrise de ecuații cu soluții analitice aproximative, neglijându-se pierderile prin difracție și ținând seama de geometria oglinzilor.

În cazul rezonatorilor reali - care impun considerarea influenței mediului amplificator sistemele de ecuații pentru distribuția câmpului nu sunt liniare și nu se pot rezolva decât prin metode numerice.

În figura 4.3 se prezintă distribuția intensității unui mod ideal (mod TEM_{00}) comparativ cu distribuția intensității unui laser cu CO_2 , măsurată într-un domeniu de putere ridicată (TEM_{01}).



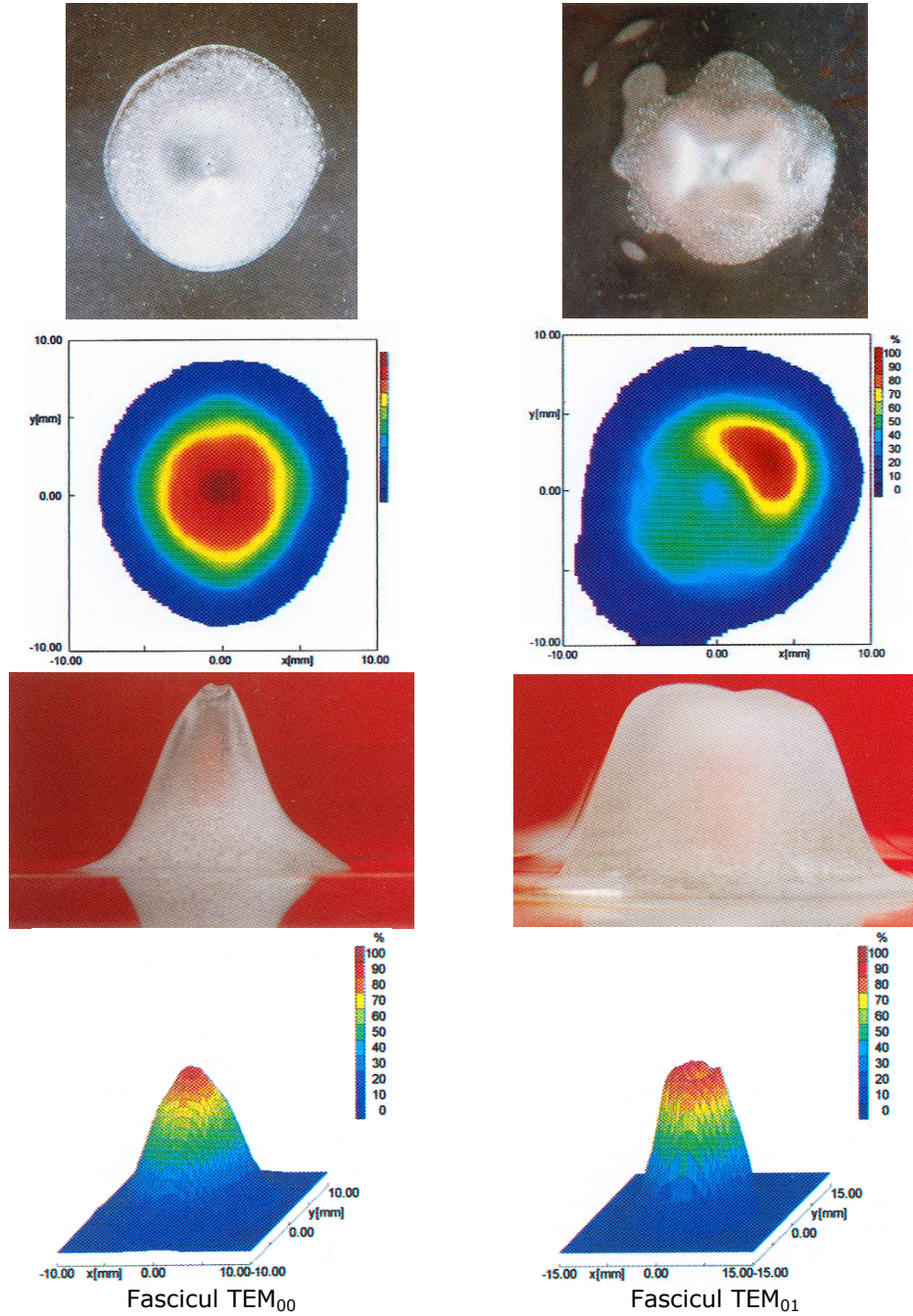


Fig. 4.3 Distribuția intensității

Pentru limitarea efectelor de difracție se folosesc aperturi "moi" (soft) caracterizate printr-o comportare lină a transmisiei la margini în contrast cu comportarea în "salt" specifică aperturilor "tari" (hard) obișnuite.

Diafragmele soft sunt obținute prin depunerea de material absorbant într-un strat cu grosime variabilă pe un substrat. Un efect similar se obține cu rezonatorii instabili cu ajutorul oglinzilor cu muchii "netede" (unele prezintă o scădere a reflectivității la margine).

4.1.4 Particularități ale interacțiunii fasciculului laser cu sisteme optice lenticulare

În fig. 4.4 se prezintă un fascicul laser în spațiul obiect respectiv imagine al unui sistem optic de focalizare.

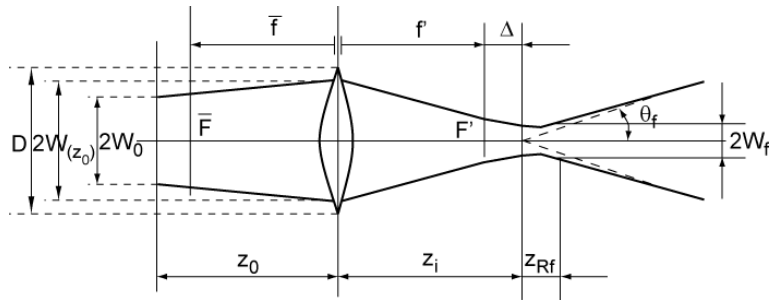


Fig. 4.4 Fascicul laser în spațiul obiect respectiv imagine al unui sistem optic de focalizare

S-au folosit notațiile:

$2W(z = 0) = 2W_0$ - diametrul taliei fasciculului

$2W_f$ - diametrul taliei fasciculului după sistemul optic

D - diametrul util al sistemului optic

z_0 - distanța dintre talia fasciculului și lentila de focalizare

$2W(z)$ - diametrul fasciculului în punctul z

z_i - abscisa taliei

Δ - distanța între focarul sistemului optic și poziția taliei.

Mărimile de mai sus se calculează cu relațiile:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad (4.6)$$

$$\text{unde } z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \text{ este lungimea Rayleigh.} \quad (4.7)$$

$$w_f = \frac{w_0 f'}{\sqrt{(z_0 - f')^2 + z_R^2}}, \quad (4.8)$$

$$\Delta = z_i - f' = \frac{w_0 f'}{(z_0 - f')^2 + z_R^2} \quad (4.9)$$

$$\text{sau } z_i = f' + \frac{f'^2(z_0 - f')}{(z_0 - f')^2 + z_R^2}$$

Divergența în câmp îndepărtat se stabilește cu relația:

$$\theta_f = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_f}. \quad (4.10)$$

Se observă că z_i - abscisa taliei - este definită prin distanța z_0 a obiectului, distanță focală și - suplimentar în raport cu legile opticii geometrice - distanțe Rayleigh, z_R , a fasciculului incident: $z_i = z_i(z_0, f', z_R)$.

Se deosebesc cazurile:

$$a) |z_0| = f' \Rightarrow \begin{cases} w_f = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} = \theta_0 f' , \\ \Delta = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

(talie fasciculului laser, w_0 , este situată în planul focal obiect al sistemului optic).

b) $|z_0| > f'$ (abscisa obiect mai mare ca distanța focală).

În acest caz

$$w_f = \frac{\theta_0 f'}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_0}{z_R}\right)^2}} = \frac{w_0 f'}{\sqrt{z_0^2 + z_R^2}} = \frac{f' \lambda}{\pi \cdot w(z_0)} \cup w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (4.12)$$

respectiv

$$\Delta = \frac{z_0 f'^2}{z_0^2 + z_R^2} \quad (4.13)$$

Pentru tehnologiile de tăiere, sudare și durificare cu laser $f' \in [60 \dots 100]$ mm U $z_0 > f'$.

În cazul laserului cu CO_2 $w_0 \in [3 \dots 10]$ mm $\Rightarrow z_R \in [3 \dots 30]$ m.

Deviația este maximă când sistemul optic se află la o distanță egală cu lungimea Rayleigh de talie fasciculului ($z_0 = z_R$).

$$\Delta_{\max} = \left(\frac{f'}{w_0}\right)^2 \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4.14)$$

Dacă se notează diametrul fasciculului în zona sistemului lenticular cu $d=2w(z_0)$ și cu f'/D_u deschiderea relativă, (D_u - diametrul util al lentilei), atunci pentru $z_0 \ll z_R$, raza petei focale devine maximă, respectiv scade cu creșterea distanței z :

$$d < D \Rightarrow w_f = \frac{w_0 f'}{\sqrt{(z_0 - f')^2 + z_R^2}} \quad (4.15)$$

c) $z_0 < f'$

În acest caz talia, fasciculului se stabilește cu relația:

$$w_f = \frac{w_0 f'}{\sqrt{(z_0 - f')^2 + z_R^2}} \quad (4.16)$$

4.1.5 Sistem optic de expandare a fasciculului laser

Din ecuația (4.12) rezultă că talia focarului $w_f = w_f(w_0, f', z_0, z_R)$.

Particularitățile tehnologiilor de prelucrare cu laser (tăiere, sudare, durificare) la care se asociază necesitatea protejării lentilelor față de materialul expulzat conduc la excluderea folosirii unor lentile cu distanțe focale mici.

Realizarea unei talii mici a spotului (premișă a creării unei intensități necesare prelucrării cu laser) impune o distanță z_0 mare cât și mărirea diametrului fasciculului incident. Ultima condiție implică utilizarea unor expandoare de fascicule.

În figura 4.5 se redă în principiu o schemă de expandare care include un telescop cu rol de a transforma fasciculul laser inițial (w_0, z_0) într-un fascicul nou care ar corespunde unui cuplu de parametri (w_0, z_0).

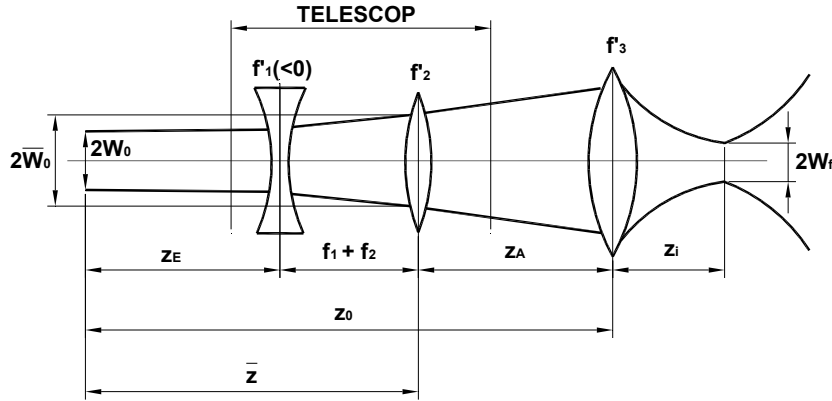


Fig. 4.5 Schema de expandare

Între caracteristicile celor două fascicule există relațiile:

$$\bar{z} = z \left(\frac{f'_2}{f'_1} \right)^2 - (f'_1 - f'_2) \frac{f'_2}{f'_1}, \quad (4.17)$$

$$\bar{z}_R = z_R \left(\frac{f'_2}{f'_1} \right)^2, \quad (4.18)$$

$$\bar{w}_0 = w_0 \left(\frac{f'_2}{f'_1} \right), \quad (4.19)$$

$$\bar{\theta}_0 = \theta_0 \left(\frac{f'_1}{f'_2} \right), \quad (4.20)$$

în care z_E este distanța dintre talia fasciculului și intrarea în telescop

z_0 - distanța dintre talia fasciculului și sistemul de focalizare.

Talia focarului w_f după expandarea fasciculului inițial se stabilește cu relația:

$$w_f = \frac{\bar{w}_0 f'_0}{\sqrt{(z + z_A)^2 + z_R^2}}, \quad (4.21)$$

z_A fiind distanța dintre sistemul de focalizare și ieșirea din telescop.

Din relațiile (4.6) și (4.8) se poate calcula parcursul fasciculului în spațiul imagine al sistemului optic:

$$w_k(z) = w_0 f' \sqrt{\frac{1}{(z_0 - f')^2 + z_R^2} + \left(\frac{z}{f'} \right)^2} \cdot \frac{1}{z_R \cdot z_{Rf}}, \quad (4.22)$$

unde $w_k(z)$ este raza fasciculului în punctul z al causticii iar

$$z_{Rf} = \frac{z_R \cdot f'^2}{(z_0 - f')^2 + z_R^2} \quad (4.23)$$

este lungimea Rayleigh a fasciculului focalizat (adâncimea focarului).

Pe lângă expandarea fasciculului telescoapele îmbunătățesc colimarea respectându-se relațiile:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{f'_2}{f'_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (4.24)$$

unde $\omega/2$ reprezintă divergența fasciculului la intrare respectiv la ieșire.

Lentilele folosite sunt de tip menisc, din ZnSe cu cea mai bună formă din punct de vedere al aberațiilor sferice, au straturi antireflex și se folosesc pentru laseri CO₂ cu puterea fasciculului peste 100 W.

4.2 Particularități ale prelucrării laser pe echipamente cu comandă - program

În contextul creșterii varietății orto-tipo-dimensionale a calității produselor, abilitatea de a răspunde cu promptitudine și eficiență la modificările rapide ale necesităților și preferințelor tot mai variate ale beneficiarilor, automatizarea s-a transformat într-un adevărat comandament al activității industriale, impunând producătorilor de bunuri materiale acceptarea unei atitudini noi față de capacitățile și sistemele tradiționale.

Cel mai mare avânt îl are, incontestabil, tehnologia informatică, caracterizată, în principal, prin creșterea flexibilității, a memoriei calculatoarelor și a vitezei de operare.

Fără un suport hard puternic și un soft adecvat, nu ar fi posibilă evoluția rapidă de la mașini-unelte cu comandă numerică NC, la mașini-unelte asistate de calculator și apoi la celule și sisteme flexibile de prelucrare.

Flexibilitatea fabricației reprezintă o caracteristică și o cerință imperioasă a fabricației pătrunzând tot mai mult în domeniul tehnologiilor și structurilor industriale, constituindu-se într-o condiție indispensabilă a dezvoltării, care implică la cel mai înalt nivel automatizarea și computerizarea.

Flexibilitatea fabricației se raportează la:

- Flexibilitatea mașinii - ușurința de a face schimbările cerute pentru prelucrarea unui lot determinat de piese
- Flexibilitatea procesului - posibilitatea de a produce un ansamblu de operații combinate
- Flexibilitatea produsului - capacitatea de a trece rapid de la fabricația unui produs la altul
- Flexibilitatea rutelor de procesare - posibilitatea de schimbare a rutelor în cazul în care este necesar
- Flexibilitatea volumului - capacitatea de a opera profitabil la volume diferite ale lotului de fabricație
- Flexibilitatea operațiilor - capacitatea de a preschimba ordinea de procesare a diferitelor operații, pentru fiecare tip de piesă sau produs atunci când este necesar.

Atributele flexibilității fabricației pentru mașinile-unelte cu comandă numerică sunt:

- posibilitatea de a procesa piese cu comandă numerică
- creșterea preciziei prelucrării pieselor
- ușurința interconectării mașinii cu componentele sistemului
- performanța calculatorului din dotarea mașinii.

Industria este puternic influențată de capacitatea unui producător de a se adapta la schimbările tehnologice, cât și de viteza de realizare a unui nou produs.

Particularitățile și tendințele fabricației pot fi caracterizate prin:

- a. Scurtarea duratei de viață a tehnologiilor, datorată puternicului impact al revoluției tehnico-științifice, costul ridicat al mâinii de lucru cu calificare superioară, exigențele sporite în domeniul calității și preciziei de prelucrare.

Necesitatea introducerii calculatoarelor de proces în conducerea automată a mașinilor unelte constă în creșterea productivității muncii și calității prin flexibilitate, fiabilitate și eliminare a intervenției operatorului uman. Astfel, în condițiile în care piesa rămâne pe mașina unealtă o fracțiune din timp reprezentând doar 5% din timpul total necesar executării ei, rezultă că timpul efectiv de prelucrare deține o pondere de numai 30% din acest procent, restul fiind necesar reglajelor, poziționărilor, controlului, mersului în gol. În acest context, reducerea timpilor auxiliari însoțită în paralel de maximizarea gradului de încărcare și a coeficientului de utilizare a mașinilor unelte au constituit soluții menite să conducă la automatizarea fabricației.

- b. Automatizarea flexibilă a proceselor de prelucrare care reprezintă în prezent coloana vertebrală a procesului de integrare pe baza tehnicii computerizate a producției.

Tehnica computerizată în structura proceselor de prelucrare a prezentat trăsăturile unei evoluții ascendente ca urmare a automatizării mașinilor-unelte izolate, integrării lor în sistem și a procesului de prelucrare condus de calculator.

Primul pas în computerizare a fost făcut datorită introducerii mașinilor cu comandă numerică care permiteau ca datele programului piesă, memorate pe purtători adecvați (banda perforată, banda magnetică) sub formă de date numerice codificate (în cod ISO, ELA etc.), împreună cu informațiile de reacție provenite de la traductoarele mașinii să fie decodificate și prelucrate numeric de către un sistem de comandă, care emitea ulterior comenzii către elementele de execuție. Datorită prețului ridicat al comenzii numerice (CN), complexității hardware-ului, fiabilității scăzute și gabariturii mare al calculatoarelor din prima generație, s-a produs un nou sistem de comandă prin calculator a mașinilor-unelte, mai performant și la un preț mai scăzut, numit sistemul CNC (Computerized Numerical Control sau comandă numerică cu calculatorul), destinat conducerii unei singure mașini-unelte sau mai multor mașini identice, pe care se execută aceleași operații, particularitatea sa constituind-o integrarea în echipamentul mașinii a unui microcalculator cu programare liberă.

Funcțiile acestuia erau multiple, pornind de la citirea, memorarea, verificarea și editarea programelor piesă, supravegherea și comanda poziției sculei, afișarea poziției organelor mobile ale mașinii, ajungând la modificări ale sistemului de referință, interpolări pe mai multe axe (liniară, circulară, parabolică), comandă adaptivă și rulare de programe de test și diagnoză. Utilizarea în arhitectura echipamentelor de comandă numerică specifice mașinilor-unelte a minicalculatoarelor, circuitelor integrate și în prezent a microprocesoarelor cu un grad de integrare pe scară largă a permis regândirea funcțiilor echipamentelor, modularizarea sistemelor de comandă și reducerea ciclurilor de elaborare a programelor, prin înlocuirea parțială sau totală a logicii cablate (cu suport fizic, relee, circuite tranzistorizate) cu logica programată (software). Astfel, s-a oferit echipamentelor de comandă un grad ridicat de adaptare și disponibilitate, indispensabile integrării lor în structura sistemelor flexibile.

Calculatorul reprezintă elementul de legătură fundamental, care conferă unitate, flexibilitate, mobilitate și autonomie operațională întregului sistem flexibil.

Acesta s-a impus ca un mijloc eficient de raționalizare, integrare și optimizare a producției, ca mijloc de colectare, prelucrare, transmitere și depozitare a volumului impresionant de informații specifice desfășurării unui proces de fabricație, constituind elementul cheie al realizării conceptului de flexibilitate, caracteristic proceselor de producție moderne. Asistarea de către calculator a proiectării și fabricației, precum și a altor compartimente ale activității unei întreprinderi industriale: pregătirea, planificarea, supravegherea producției, aprovizionarea, desfacerea și asigurarea calității etc. încearcă să surprindă caracterul dinamic al interacțiunii dintre funcții, impunând crearea unui modul nou în jurul informațiilor despre produs, corespunzător arhitecturi spațiale, integratoare multinivel. Calculatorul a reușit să facă, în domeniul tehnologiilor de fabricație, trecerea de la mașina-unealtă tradițională la mașina informatizată, capabilă să acționeze inteligent.

Dezvoltarea actuală și viitoare în domeniul automatizării poate fi sintetizată prin următoarele tendințe:

- Perfecționarea în continuare a construcției echipamentelor de comandă numerică, prin creșterea gradului de universalitate, reducerea costului de producție și a gabaritului
- Extinderea echipamentelor cu calculator integrat (tip CNC) acestea având o mai mare flexibilitate în programare și eliminând multe erori
- Extinderea sistemelor DNC, prin crearea unor sisteme ierarhice, care să facă posibilă realizarea secțiilor și uzinelor automate
- Extinderea sistemelor integrate flexibile de prelucrare, precum și robotizarea lor
- Extinderea mașinilor-unelte cu comandă adaptivă, limitativă și opțională
- Utilizarea laserului ca sculă la mașini-unelte
- Introducerea limbajelor de programare, orientate pe probleme de tehnică de fabricație, care face legătura între om și calculatorul electronic.

Programarea prelucrării unor piese complexe necesită un mare volum de calcule, greu rezolvabile, prin metode și prelucrare manuală, generatoare de erori datorate programatorului uman, motiv pentru care se face cu ajutorul calculatorului electronic, numindu-se programare asistată.

Dezvoltarea limbajelor de programare a comenzilor numerice (APT, EXAPT, TELEAPT, IFAPT, MITURN), apariția roboților industriali, comandați de calculator și a dispozitivelor de manipulare și transport a pieselor și sculelor cu comandă informatizată, conveiere, robocare, transfocatoare etc., au pregătit condițiile necesare realizării interconectării diverselor mașini izolate, în cadrul sistemelor de prelucrare, prin intermediul calculatorului.

Subsistemul informațional deține și controlul asupra subsistemului automat și subsistemului tehnologic de prelucrare a pieselor, prin culegerea, prelucrarea, memorarea și transmiterea informațiilor privind mișcările în spațiu și timp ale semifabricatelor, pieselor finite, sculelor și dispozitivelor, stadiul curent de realizare a sarcinilor tehnologice de fabricație, comportarea mașinilor, proceselor de prelucrare și control etc. Conducerea sistemelor flexibile de prelucrare și asigurarea unei exploatare optime a fiecărei mașini ce intră în componența acestora sunt simultan realizate în memoria calculatorului și transmise mașinilor-unelte cu comandă numerică în funcție de necesități. Cerințele multiple impuse de funcționarea unui sistem flexibil de prelucrare, caracterizat printr-un grad ridicat de complexitate și varietate, au dus la crearea unei arhitecturi ierarhice multifuncționale a sistemului de comandă, organizat pe verticală pe trei niveluri: nivelul superior (central), nivelul mediu (comanda proceselor) și nivelul local (comanda prelucrării).

Nivelul superior este constituit, de regulă, dintr-un calculator de proces care îndeplinește în principal funcțiile referitoare la gestiunea bazei de date a programelor piesă, gestiunea bazei de date statistice și a datelor referitoare la scule, monitorizarea și simularea funcționării sistemului, planificarea producției, etc. Supravegherea stării sistemului constă dintr-un ansamblu de măsuri de hard și soft, al căror scop este verificarea permanentă a capacității de funcționare a sistemului la parametrii stabiliți. Funcția de supraveghere este distribuită la nivelul fiecărui modul și efectuată la nivelul întregului sistem. Funcția de planificare soluționează în mod eficient generarea informațiilor referitoare la restricțiile impuse sculelor și dispozitivelor de prindere și fixare, optimizarea sarcinilor de producție și de distribuției a sculelor și paletelor, cerințelor noi reclamate de procesul de prelucrare, elaborarea proiectelor de utilizare și de încărcare a mașinilor în condițiile schimbării tipului de produs. Tehnicile CAD/CAM se referă la integrarea calculatoarelor în întregul ciclu de realizare a unui produs, de la proiectarea acestuia până la fabricația efectivă.

CAD reprezintă utilizarea sistemelor de calcul în procesul de proiectare a produsului în vederea prelucrării rapide a informațiilor, asigurând optimizarea unor factori de performanță pentru realizarea specificațiilor de proiectare și evaluare a variantelor posibile. CAD utilizează limbaje de programare de nivel înalt, sisteme grafice cu grad ridicat de interacțiune, oferind proiectantului posibilitatea manipulării unor structuri geometrice complexe, generarea și actualizarea eficientă a documentației.

CAM reprezintă utilizarea calculatoarelor pentru generarea datelor necesare prelucrării, a programelor de fabricație, comanda parțială sau integrală a tuturor proceselor de prelucrare, inclusiv a mașinii-unelte cu comandă numerică, roboți industriali, controlere programabile precum și coordonarea funcționării sistemului. Legătura dintre sistemele flexibile de prelucrare și CAD/CAM permite realizarea unei viteze mari de răspuns la nivel local.

Pentru debitarea roților dințate din material plastic cu laser a fost utilizat programul Laser DX3 în vederea generării programelor NC.

Este conceput ca o extensie AutoCAD, completând facilitățile acestuia în domeniul proiectării constructive asistate de calculator și introducând un puternic modul de programare a mașinilor unelte cu comandă numerică.

Este structurat pe trei secțiuni și asigură conducerea procesului de fabricație a reperului de la schița de bază până la piesa finită.

Modulul de proiectare constructivă a reperului completează o serie de funcții de bază AutoCAD pentru a le adapta specificului domeniului. Facilitează obținerea unui fișier de tip DWG, care reprezintă desenul piesei 2D.

Modulul de proiectare a tehnologiei de fabricație pe mașina unealtă cu comandă numerică cuprinde partea de procesare și postprocesare necesare pentru obținerea fișierului text, reprezentând programul de prelucrare CNC a piesei pe echipamentul laser.

Modulul de transfer a fișierului de comandă numerică, cu adaptare la formatul de gestiune a fișierelor, specific calculatorului echipamentului CNC de pe mașina unealtă - asigură transferul programului de prelucrare CNC, obținut anterior cu Laser DX3, pe calculatorul mașinii - unelte.

Datele de intrare sunt fișiere CAD (DXF), care sunt importate, pentru a fi generat desenul de execuție cu figurarea traseului de prelucrare, a punctelor de intrare/ieșire și a curselor în gol precum și programul NC.

Programul alocă automat direcțiile optime de tăiere, intrări și ieșiri ale sculei, ordinea secvențelor de prelucrare, procedeele de prelucrare și alte opțiuni de prelucrare NC.

Laser DX3 permite procesarea automată a unei serii de fișiere CAM, efectuând conversia acestora în cod NC. Aceste fișiere pot fi importate ca atare (mai multe fișiere conținând fiecare câte o piesă anume) sau poate importa un fișier în care sunt mai multe componente rezultate în urma comenzii Explode data unui ansamblu.

Modulul de verificare, editare și sortare a codurilor NC generate permite afișarea sub formă grafică a piesei de prelucrat precum și a traseelor de tăiere, a punctelor de intrare - ieșire, curse în gol etc. Laser DX3 oferă posibilitatea modificării manuale a programului NC, permite selectarea parametrilor de tăiere, cât și listarea la imprimantă a codului NC în format text.

Fabricarea piesei se încheie prin prelucrarea acesteia, pe baza programului de prelucrare CNC pe mașina unealtă cu comandă numerică.

4.3 Elemente privind precizia de prelucrare cu tehnologii laser

Prin specificul prelucrării cu laser, utilizându-se radiații puternic concentrate, dimensiunile prelucrărilor realizate sunt relativ mici. În aceste condiții studiul factorilor ce afectează precizia de execuție are o importanță deosebită. Precizia de prelucrare cu laser poate fi privită sub două aspecte:

- macrogeometric
- microgeometric.

Sub aspect macrogeometric, precizia de execuție este determinată de parametrii radiațiilor laser (puterea fasciculului, durata de acțiune a laserului, mărimea spotului pe material), de modul cum se poziționează piesa în raport cu punctul de focalizare al radiațiilor în plan orizontal xoy cât și în lungul axei oz, respectiv mărimea și sensul defocalizării. Acești factori pot introduce erori care să afecteze precizia de poziționare pe piesă a zonei de prelucrat, mărimea acesteia, adâncimea de penetrare a radiațiilor în material, precizia de formă geometrică și rugozitatea suprafețelor prelucrate.

Din punct de vedere microgeometric, precizia de prelucrare cu laser depinde de modul de generare al radiațiilor laser, de distribuția spațială și temporală a energiei fasciculului, de imperfecțiunile sistemelor optice ale generatorului, de stabilitatea temporală și spațială a parametrilor radiațiilor. Astfel, distribuția asimetrică a intensității fasciculului laser poate fi provocată de neomogenitățile mediului activ, neuniformitatea pompajului sau alinierii imprecise a elementelor cavității rezonante.

În același timp, ineficiența sistemului de răcire pentru mediul activ și lampa de pompaj (datorită calității, temperaturii și circulației necorespunzătoare a lichidului de răcire) poate provoca deformări termice ale bastonului laser sau cavității rezonante, având ca efect variația parametrilor radiațiilor (durata impulsurilor putând crește de câteva ori, iar energia fasciculului de 5-10 ori față de valorile reglate). Acești factori, ce afectează precizia de prelucrare, influențează și reproductibilitatea execuției sau uniformitatea distribuției temperaturii în piesă, la suprafață și în adâncime.

La prelucrarea laser rugozitatea suprafețelor este influențată de fenomenele care apar la interacțiunea radiației laser cu materialul piesei. Geometria suprafeței prelucrate depinde de modul de focalizare a radiațiilor și de poziția piesei în raport cu focarul principal și focarele parazite, provocate de radiațiile care au un alt unghi de incidență și radiațiile cu lungimi de undă apropiate lungimii de undă a fasciculului

normal. De asemenea, macro și microgeometria suprafeței este influențată și de instabilitatea emisiei, duratei și energiei radiațiilor laser, cât și de efectul modificărilor fizico-chimice ce au loc în microplasma și soluția lichidă formată în timpul prelucrării. În același timp, precizia de execuție a găurilor depinde de modul în care are loc evacuarea, răcirea și solidificarea materialului afectat de laser.

La prelucrarea unor materiale sensibile la căldură, pentru a se evita declanșarea sau favorizarea unor reacții chimice în material, în zona prelucrată, este indicat să se lucreze în incinte vidate sau să se sufle în timpul prelucrării un gaz neutru, de obicei heliu.

Alți factori care afectează sensibil stabilitatea în timp a parametrilor radiațiilor laser, și deci precizia de prelucrare, depind atât de uzura și durata de utilizare a oglinzilor cavității rezonante și a suprafețelor reflectante ale cavității de pompaj, cât și de componentele sistemelor optice ale generatorului laser. Uzura și vârsta mediului activ laser și a lămpilor de pompaj vor determina atât descreșterea gradată a energiei și duratei impulsurilor laser, cât și mărirea divergenței fasciculului față de valorile reglate, cu repercusiuni negative asupra preciziei dimensionale și a reproductibilității prelucrărilor executate.

De asemenea, cercetările experimentale au evidențiat că, atunci când se estimează precizia de prelucrare cu laser, trebuie să se țină seama și de neomogenitățile structurii și proprietăților materialului prelucrat. De multe ori, unele impurități sau urme de gaze pot favoriza, în urma acțiunii laserului, formarea unor microcentre de fierbere sau vaporizare a materialului la temperaturi mult mai coborâte decât restul materialului prelucrat, afectând astfel precizia prelucrării. Acești factori cresc în importanță când dimensiunile prelucrărilor sunt comparabile cu mărirea neomogenităților sau atunci când concentrația acestora este mai mare în masa materialului prelucrat.

4.4 Concluzii. Contribuții personale

Capitolul al patrulea al lucrării pune în evidență câteva particularități ale prelucrărilor mecanice prin tehnologii laser, asupra cărora urmează să se prezinte puncte de vedere originale, cu soluții de optimizare menite să îmbunătățească o serie de parametri de calitate ai pieselor prelucrate și prelucrării în sine, privită ca proces.

Primul paragraf se referă la componența sistemului optic de transport și focalizare a fasciculului laser și analizează influența structurii și calității acestuia asupra focalizării și densității de putere în spotul focalizat pe suprafața semifabricatului.

Parametrii optici și energetici inițiali ai fasciculului laser emis de sursă necesită modificări determinate de tipul prelucrării (tăiere, sudare), natura materialului prelucrat, geometria piesei. În acest scop, echipamentul de prelucrare include un subansamblu optic, format din expandor și obiectiv de focalizare. Parametrii de calitate non-imaging ai acestor subansambluri determină în mod direct mărirea spotului și distribuția energetică pe suprafața acestuia.

Monocromaticitatea laserilor elimină posibilitatea manifestării aberațiilor cromatice. Directivitatea și, respectiv divergența foarte redusă elimină cauzele apariției aberațiilor specifice fasciculelor înclinate (coma, astigmatism, distorsiune). Principala aberație care afectează sistemele asociate mașinilor de tăiere cu laser este aberația de deschidere. Aceasta este menționată în literatura de specialitate, iar efectele sale sunt cuantificate prin relații care redau variația gabariturii radial al

fascicului emergent funcție de abscisa obiect și planul de focalizare. Expresiile analitice disponibile sunt destinate, însă, exclusiv analizei și nu pot fi utilizate ca algoritmi de proiectare, având în vedere numărul mare de variabile și formalismul matematic relativ complex. Având în vedere importanța deosebită a sistemului optic de transport și focalizare, se consideră perfect justificat un demers de elaborare a unui algoritm de sinteză și analiză complet al sistemului.

A doua secțiune a capitolului vizează implementarea sistemelor CAD/CAM pe echipamentele de prelucrare cu laser. Fasciculul de tăiere nu poate fi dirijat manual, iar piesele prelucrate prin această tehnologie neconvențională sunt, în general, piese cu geometrie complexă, dificil sau imposibil de realizat prin metode de prelucrare convenționale. Din aceste motive, proiectarea CAD a piesei (respectiv elaborarea unui desen de execuție cu caracter special, într-un format electronic compatibil cu softul atașat mașinii), translatarea fișierului CAD într-o formă compatibilă cu comanda numerică și conducerea întregului proces de prelucrare cu ajutorul calculatorului, reprezintă, în prezent o condiție sine-qua-non pentru exploatarea unui echipament care să asigure flexibilitate, eficiență și precizie de prelucrare. Este descris programul Laser DX3, care prin modulele sale asigură generarea codului NC, pornind de la un fișier CAD în format *.dxf. Sunt prezentate facilitățile de generare, editare, verificare, modificare și tipărire ale codului NC generat de program.

Ultimul paragraf analizează minuțios elementele de influență a preciziei prelucrării. Sunt menționate legăturile directe între soluțiile constructive ale subansamblurilor mecanice și optice ale mașinii, caracteristicile spectrale, energetice și geometrice ale laserului, natura materialului și prezența impurităților în materialul piesei, gradul de finisare al acesteia, natura stratului superficial al semifabricatului, forma geometrică a piesei, asupra preciziei macro și microgeometrice a piesei prelucrate.

Concluzia generală care rezultă prin analiza materialului cuprins în prezentul capitol este aceea că în procesul de tăiere a pieselor cu fascicule laser intervin o serie largă de factori optici, mecanici și energetici, importanți în sine, dar mai ales în corelație, astfel încât atât subansamblurile cu rol funcțional distinct, cât și procedeul tehnologic privit ca proces, sunt susceptibile la numeroase perfecționări.

Pe parcursul capitolului se pot evidenția următoarele contribuții personale:

- identificarea celor mai importanți factori optici și energetici care influențează mărimea spotului laser focalizat și distribuția energetică pe suprafața petei focale de difuzie
- extragerea din literatura de specialitate a unui sumar relevant pentru aparatul matematic de tratare a sistemului optic asociat echipamentului de prelucrare cu fascicul laser, cu observația inconsistenței suportului analitic pentru scopuri de proiectare, având parametri de ieșire impuși
- asimilarea softului Laser DX3 necesar desfășurării unui program experimental.

[A1] [B4] [B9] [B10] [C3] [C4] [C5] [C10] [C11] [H3] [P2] [P3] [P4] [Q1] [S2]
[***]

5. SINTEZA OPTIMALĂ A UNUI SISTEM OPTIC ASOCIAT UNUI LASER CU CO₂, DE PUTERE MEDIE, DESTINAT PRELUCRĂRILOR MECANICE

5.1 Sisteme optice asociate echipamentelor laser pentru prelucrări mecanice precise

Fasciculul de radiație emis de o sursă laser nu poate fi utilizat direct pentru prelucrarea mecanică a unor piese confecționate din diverse materiale și care necesită precizii de prelucrare specifice. Parametrii geometrici și de distribuție a energiei caracteristici fasciculului radiant, trebuie ajustați astfel încât să asigure obținerea unei piese din metale sau materiale plastice, într-o singură operație de tăiere, care să asigure atât precizia dimensională și a formei, cât și prescripțiile privind starea suprafeței.

Ajustarea parametrilor fasciculului de prelucrare se realizează prin introducerea în schema echipamentului de prelucrare a unui sistem optic, care trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- să asigure transportul energiei de la sursă la locul prelucrării
- să focalizeze fasciculul laser în punctele aparținând unei traiectorii care urmărește conturul piesei
- să nu fie afectate proprietățile optice (transmitanță, refractanță) și geometrice ale componentelor optice de transport
- să permită defocusarea controlată astfel încât dimensiunile petei de difuzie și densitatea energetică a radiației pe traiectoria de tăiere să fie adecvate caracteristicilor mecanice și termice ale materialului piesei de prelucrat, vitezei și preciziei de prelucrare.

Schema de principiu a unui sistem optic asociat prelucrărilor laser este prezentată în figura 5.1 și conține două subansambluri distincte din punct de vedere funcțional:

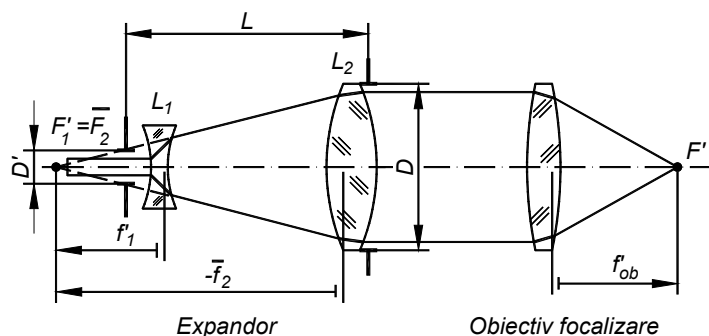


Fig. 5.1 Schema sistemului optic asociat sistemelor de prelucrare laser

- expandorul (fig. 5.2), preia fasciculul provenit de la sursă și are rolul de a modifica deschiderea acestuia. Expandorul are ca scop transportul de energie de la sursă la locul de prelucrare. Pe traseul de transport, parametri energetici ai fasciculului sunt modificați în sensul creșterii diametrului acestuia și, consecutiv a reducerii densității de energie. Transportul direct și incidența pe obiectivul de focalizare nu reprezintă o soluție practică datorită faptului că obiectivul în sine ar fi afectat termic până la distrugere. Din punct de vedere optic, expandorul este o lunetă Galilei inversată, compusă dintr-o lentilă divergentă și una convergentă, montate afocal

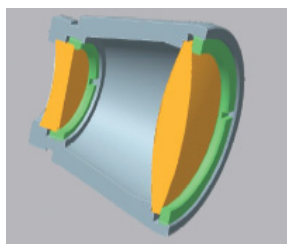


Fig. 5.2 Expandor laser

- obiectivul de focalizare, care proiectează fasciculul laser în planul punctelor de prelucrare, la parametri controlabili din punct de vedere al mărimii petei de difuzie și densității de energie. Din punct de vedere optic, obiectivul este o lentilă sau un subansamblu convergent.

Cele două subansambluri – expandorul și obiectivul de focalizare – se fixează într-o montură, astfel încât precizia poziționării relative axiale și radiale să fie mai ușor de realizat practic. Întregul sistem optic asociat echipamentului de prelucrare se prezintă ca un subansamblu opto-mecanic monobloc (fig. 5.3)



Fig. 5.3 Expandor și obiectiv de focalizare în montură

Expandoarele asigură, funcție de aplicație, un coeficient de expandare în gama $[1.5...10] \times$, iar obiectivele de focalizare sunt caracterizate prin distanțe focale în domeniul $[40...200]$ mm. Gabaritul subansamblului optomecanic $[\Phi \times L]$ variază între $[30...50] \times [30...160]$ mm.

Tubului mecanic care conține expandorul și obiectivul de focalizare i se atașează capul propriu-zis de tăiere (fig. 5.4), care conține elementele mecanice de reglare a focusării. Defocusarea este asigurată pe un domeniu larg, de cel puțin ± 4 mm, cu ajutorul unei soluții mecanice de precizie foarte ridicată (controlul distanței de impact se realizează la nivel de micrometru).



Fig. 5.4 Cap de tăiere care asigură defocusarea adecvată

Vârful conic de proiecție a fascicului de tăiere (duza) are o deschidere minimă fixă de [0.5...4] mm și beneficiază de un sistem micrometric independent de reglare a poziției în planul xy.

Față de luneta Galilei tradițională, expandoarele laser prezintă următoarele particularități:

- sistemul telescopic este inversat, astfel încât grosimentul este subunitar. Acesta, exprimat de fapt prin coeficientul de expansiune, este indicat prin valori inverse, supraunitare, care definesc raportul dintre deschiderea fascicului la intrarea, respectiv ieșirea din sistem
- unghiul de înclinare al fascicului de intrare este practic nul, având în vedere divergența de ordinul miliradianilor (neglijabilă din punct de vedere al calculului optic de gabarit) a laserilor
- componentele optice ale expanderului sunt constituite din lentile singulare. Această simplificare majoră în raport cu sistemele tradiționale este facilitată atât de monocromaticitatea radiației (care elimină posibilitatea manifestării aberațiilor cromatice) cât și de înclinarea nulă a fascicului în raport cu axa optică (fiind evitată astfel prezența comei și astigmatismului). Curbura câmpului, deși prezentă, poate fi neglijată datorită faptului că spotul laser focalizat are dimensiuni foarte reduse și, practic, se află totdeauna pe axa optică
- cea mai importantă aberație care afectează sistemul este aberația sferică sau de deschidere. Aceasta influențează mărimea petei de difracție, dar poate fi controlată, în anumite limite, prin defocusare. În aceste condiții, proiectarea lentilelor sistemului apelează algoritmi care furnizează ca soluții lentile de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice.

Obiectivul, pe care este incident fasciculul paralel, de deschidere mare, emergent expanderului, este tot o lentilă singulară, care nu prezintă probleme în privința aberațiilor cromatice și a aberațiilor geometrice specifice fasciculelor înclinate, ci este afectată tot numai de aberație sferică. Proiectarea lentilei obiectiv se bazează, de asemenea, pe algoritmul lentilei de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației de deschidere.

Sistemele optice asociate echipamentelor de tăiere cu laser, reprezintă aplicații, care, din punct de vedere optic, aparțin domeniului non-imaging. În acest caz, parametrii de calitate ai sistemului vizează abscisa, forma și mărimea petei de difuzie proiectate pe traiectoria de tăiere. Interesează, de asemenea, profunzimea focarului, care are influență directă asupra caracterului rectiliniu al generatoarei

curbei care descrie conturul piesei prelucrate. Referitor la cele patru elemente importante pentru procesul de prelucrare, enunțate mai sus, se pot aduce următoarele observații:

- cel mai ușor de controlat este forma petei de difuzie. Ideal, spotul trebuie să fie circular, pentru a asigura o distribuție uniformă de energie. Aceasta determină direct distribuția câmpului termic în zona de interacțiune cu materialul și, ca urmare, impune direct coordonatele (x,y) ale punctelor în care este inițiată topirea locală. Locul geometric al acestor puncte constituie conturul piesei. Precizia dimensională și de formă sunt determinate de abaterile conturului real în raport cu forma ideală prescrisă în documentația de execuție a piesei. Forma circulară a petei de difuzie poate fi controlată prin mijloace strict mecanice. Acestea trebuie să asigure alinierea optică de-a lungul axei z – axa optică – și centrarea duzei de proiecție a spotului în planul (x,y) . Dispozitivele mecanice destinate acestor reglaje pot asigura controlul pozițional cu precizie micrometrică și, ca urmare, în abordarea care urmează a problemelor din punct de vedere optic, se va considera că aceste cerințe de reglare sunt satisfăcute
- mărimea petei de difuzie poate fi controlată prin variația parametrilor caracteristici sistemului optic. Acesta trebuie proiectat în mod optim pentru că odată stabilite caracteristicile geometrice și de material ale componentelor, mărimea spotului nu mai poate fi modificată. Rezultă că pentru mărimea petei de difuzie sunt foarte importante valorile impuse ca date intrare în proiectarea sistemului optic.

Practic, mărimea spotului de radiație are două componente cu caracter aditiv: una datorată efectelor difracției pe conturul monturilor și una datorată aberației sferice. Din experiență, producătorii de profil, indică o relație orientativă, utilă ca punct de pornire în proiectarea sistemului optic, considerând diametrul spotului ca sumă aritmetică a contribuțiilor difracțională și aberațională:

$$d_{\text{spot total}} = d_{\text{spot difracțional}} + d_{\text{spot aberațional}}, \quad (5.1)$$

unde:

$$d_{\text{spot difracțional}} = \frac{4\lambda M^2 f'}{\pi D}, \quad (5.2)$$

$$d_{\text{spot aberațional}} = \frac{kD^3}{f'^2}. \quad (5.3)$$

În relațiile (5.2), (5.3) λ reprezintă lungimea de undă [μm],

M – parametru modal al fasciculului (care în majoritatea aplicațiilor poate fi considerat unitar) [-]

f' – distanța focală a obiectivului de proiecție [mm]

D – apertura utilă a obiectivului de proiecție [mm]

k – coeficient adimensional dependent de indicele de refracție [-].

Firma II-VI IR Corporation indică, pentru $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, valorile k înscrise în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Material	Lentila menisc	Lentila plan-convexă
ZnSe	0.0187	0.0286
GaAs	0.0114	0.0289
Ge	0.0087	0.0596
CdTe	0.0155	0.0284

Mărimea spotului prezintă o puternică dependență de numărul de deschidere al obiectivului și, totodată de fiecare variabilă care intră în definiția sa:

$$f / \# = \frac{f'}{D}. \quad (5.4)$$

Apertura D , de exemplu are influențe inverse asupra celor două componente ale mărimii spotului. Creșterea deschiderii conduce la micșorarea efectelor difracției (care, în mod ideal sunt nule la deschideri infinite), dar, în același timp accentuează impactul aberației sferice. În figura 5.5 sunt ilustrate aceste aspecte prin reprezentarea separată a curbelor (5.1), (5.2) și (5.3) pentru un sistem cu focala fixată și deschiderea considerată ca variabilă independentă. Sistemul lucrează cu lungimea de undă de $10.6 \mu\text{m}$ și are un obiectiv din ZnSe cu $f' = 100 \text{ mm}$.

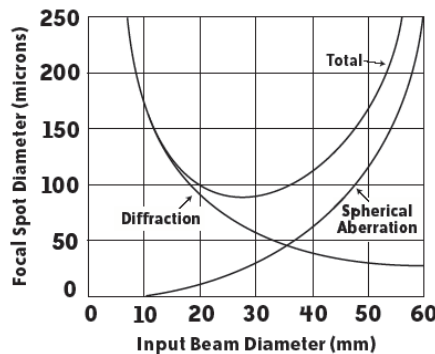


Fig. 5.5 Variația spotului de radiație în raport cu deschiderea obiectivului

Se observă că la deschideri mici efectul aberației sferice este practic nul, preponderent fiind cel de difracție. Pe măsură ce apertura crește, aberația sferică este tot mai accentuată (creșterea este proporțională cu pătratul deschiderii), în timp ce efectul difracției este tot mai diminuat. Curba sumă, indicată prin "Total" prezintă un minim în vecinătatea punctului (25, 100).

Practic, în proiectare trebuie impuse atât focala, cât și deschiderea. Dacă se impune distanța focală a obiectivului, literatura recomandă o deschidere optimă:

$$D = 4 \sqrt{\frac{4\lambda M^2 f^3}{3\pi k}}. \quad (5.5)$$

Dacă se impune deschiderea, recomandarea pentru focala optimă este:

$$f' = 3 \sqrt{\frac{\pi k D^4}{2\lambda M^2}}. \quad (5.6)$$

Deschiderea poate rezulta ca mărime fixă, având în vedere faptul că fasciculul emis de sursă are un diametru dat, iar alegerea materialelor expandorului pe considerente economice, impune o anumită valoare a densității de putere și, consecutiv, determină un anumit coeficient de expandare.

– abscisa spotului și profunzimea focarului sunt strâns corelate și în directă dependență cu mărimea spotului. Vor depinde deci de calitatea proiectării sistemului optic.

Abscisa spotului poate fi modificată prin defocusare, operație care se execută cu ajutorul unor dispozitive mecanice micrometrice. Mărimea spotului variază cu abscisa de proiecție și dimensiunile sale minime, în general, nu corespund focarului paraxial. Prin defocusare se poate găsi relativ ușor un minim al diametrului

spotului. Problema care se pune este dacă profunzimea focarului este suficient de mare pentru a asigura precizia tăierii. Din punct de vedere optic, o profunzime corespunzătoare a focarului înseamnă o caustică având ramuri cât mai deschise, de formă cât mai plată. Pentru un sistem dat, profunzimea focarului se poate evalua aproximativ cu formula empirică:

$$PF = \frac{8\lambda M^2}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{f'}{D}\right)^2, \quad (5.7)$$

unde ρ este un factor de toleranță supraunitar, la care partea supraunitară reprezintă abaterea procentuală admisă la secțiunea causticii. În figura 5.6 este ilustrat conceptul de profunzime a focarului, PF și legătura sa cu precizia prelucrării. Dacă grosimea piesei de tăiat este b , iar dimensiunea minimă a spotului este a , din relația (5.7) se poate determina ρ .

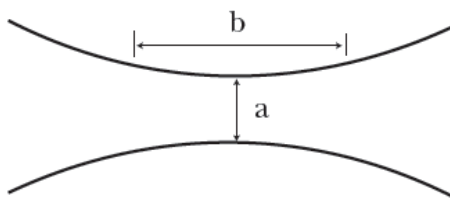


Fig. 5.6 Profunzimea focarului

Dacă se impune o valoare ρ (de exemplu $\rho = 1.05$ semnifică o creștere cu 5% a secțiunii causticii) și prin defocusare se cunoaște a , se poate determina PF, respectiv grosimea b a piesei care poate fi tăiată cu o precizie de $(\rho - 1)\%$.

5.2 Algoritmi de calcul de gabarit al expandorului și obiectivului de focalizare. Sinteza componentelor optice lenticulare pentru echipamente laser

Se propune, în continuare, un algoritm de calcul de gabarit al expandorului. Ca date de intrare se impun:

- coeficientul de expandare, Γ (ca mărime pozitivă, supraunitară, care exprimă raportul dintre diametrul fasciculului emergent, respectiv incident). Alegerea mărimii coeficientului de expandare are în vedere un criteriu energetic: densitatea de energie este invers proporțională cu pătratul coeficientului de expandare)
- lungimea aproximativă a subansamblului, L
- deschiderea fasciculului incident, D' .

Determinarea caracteristicilor optice de gabarit presupune rezolvarea a două etape corespunzătoare repartiției puterilor optice (distanțelor focale) pe componente:

$$f'_1 = -\frac{L}{\Gamma - 1}, \quad (5.8)$$

$$f'_2 = \frac{L\Gamma}{\Gamma - 1}, \quad (5.9)$$

$$D = \Gamma \cdot D', \quad (5.10)$$

unde f'_1 este distanța focală a lentilei divergente,
 f'_2 - distanța focală a lentilei convergente
 D - apertura utilă a lentilei convergente.

Urmează proiectarea fiecărei lentile. Proiectarea efectivă a unei lentile presupune determinarea razelor de curbură r_1 și r_2 , a diametrului total D_t , a grosimilor la centru d și la margine t , (fig. 5.7), în condițiile în care se cunosc puterea optică Φ (sau distanța focală f'), diametrul util D_u și caracteristicile unui sort de sticlă optică ales pentru lentilă.

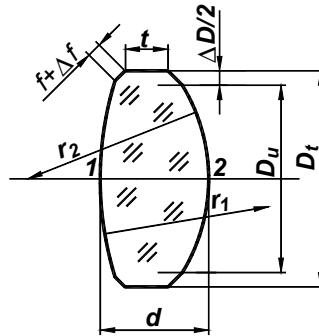


Fig. 5.7 Caracteristicile geometrice ale unei lentile

Diametrul total al lentilei rezultă prin însumarea diametrului util cu un adaos de montaj a cărei mărime depinde de diametrul util și de modul de fixare (tab. 5.2).

Tabelul 5.2

D_u [mm]	Modul de fixare			
	Sertizare		Cu inel filetat	
	ΔD [mm]	$f^{+\Delta f}$ [mm]	ΔD [mm]	$f^{+\Delta f}$ [mm]
≤ 6	0.6	$0.1^{+0.1}$	-	-
6...10	0.8	$0.3^{+0.2}$	1.0	$0.1^{+0.1}$
10...18	1.0	$1.4^{+0.2}$	1.5	$0.2^{+0.2}$
18...30	1.5	$0.5^{+0.2}$	2.0	$0.3^{+0.2}$
30...50	2.0	$0.7^{+0.3}$	2.5	$0.4^{+0.2}$
50...80	2.5	$1^{+0.5}$	3.0	$0.5^{+0.2}$
80...100	-	-	3.5	$0.6^{+0.4}$
>100	-	-	4.0	$0.7^{+0.5}$

Tabelul 5.2 conține și indicațiile de execuție a fațetelor lentilei, notate cu f și prelucrate, în general, la 45°.

Razele de curbură se determină în ipoteza lentilei infinit subțiri (echivalente), la care grosimea este neglijată.

Puterea optică a unei lentile infinit subțiri se poate scrie sub forma:

$$\Phi' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n-1)(c_1 - c_2) = (n-1)c, \quad (5.11)$$

unde $c_{1,2}$ reprezintă curburile lentilei, definite prin inversul razelor, iar $c=c_1-c_2$ este curbura totală (specifică sau netă) a lentilei.

Se observă faptul că dacă în ecuația (5.11) este impusă valoarea distanței focale și se cunoaște indicele de refracție al sticlei n , se poate determina o dublă infinitate de soluții (r_1, r_2). Practic, puterea impusă unei lentile determină o anumită valoare a curburii totale, care poate fi asigurată prin forme constructive diferite. Un

studiu simplu arată că pentru o curbură totală dată, lentila poate lua oricare dintre formele constructive posibile, în funcție de valorile curburilor celor doi dioptri. În figura 5.8 este ilustrată această trecere prin diverse forme a unei lentile având curbura totală $c = 0.2 \text{ m}^{-1}$, prima curbură inițială $c_1 = -0.1 \text{ m}^{-1}$ și rata de creștere $\Delta c_1 = 0.1 \text{ m}^{-1}$.

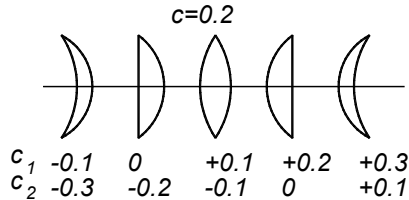


Fig. 5.8 Forme diferite ale unei lentile de putere, respectiv curbură totală date

Pentru lentilele singulare, având la dispoziție cele două variabile r_1 și r_2 , se pot asigura puterea optică și controlul unei aberații, în cazul de față, aberația sferică.

Aberația sferică primară, determinată ca sumă a contribuției celor doi dioptri, poate fi exprimată sub forma:

$$ds' = -\frac{h^4}{n_2^2 \sigma_2} \left(G_1 c^3 - G_2 c^2 c_1 + G_3 c^2 \frac{1}{s} + G_4 c c_1^2 - G_5 c c_1 \frac{1}{s} + G_6 c \left(\frac{1}{s} \right)^2 \right), \quad (5.12)$$

unde h este înălțimea de incidență,

n'_2 - indicele de refracție în mediul imagine,

$\sigma'_2 = h/s'$,

s, s' - abscisele obiect și imagine,

$G_j(j=1...6)$ - coeficienți care depind de indicele de refracție de referință și se calculează cu relațiile:

$$G_1 = \frac{1}{2} n^2 (n - 1), \quad G_2 = \frac{1}{2} (2n + 1)(n - 1), \quad (5.13)$$

$$G_3 = \frac{1}{2} ((3n + 1)(n - 1)), \quad G_4 = \frac{1}{2n} (n + 2)(n - 1), \quad (5.14)$$

$$G_5 = 2 \frac{(n^2 - 1)}{n}, \quad G_6 = \frac{1}{2n} (3n + 2)(n - 1). \quad (5.15)$$

Analizând relația (5.12) se observă că aberația sferică are forma unui polinom de gradul II în raport cu prima curbură a lentilei. În figura 5.9 este prezentată calitativ variația aberației sferice și modificarea formei unei lentile convergente având ca variabilă independentă prima curbură.

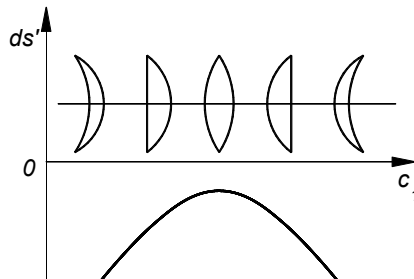


Fig. 5.9 Variația aberației sferice primare funcție de forma constructivă a unei lentile convergente de putere (curbură totală) dată

Parabola de gradul II nu intersectează în nici un punct axa absciselor, ceea ce semnifică faptul că aberația sferică nu poate fi anulată nici chiar teoretic. Valoarea minimă a aberației corespunde vârfului parabolei, care se află cel mai aproape de axa Oc₁.

Lentila caracterizată prin valoarea minimă a aberației sferice se numește lentilă de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice. Razele care definesc această formă rezultă prin diferențierea expresiei (5.12) în raport cu prima curbura și impunerea condiției de minim, ceea ce conduce la ecuația:

$$-G_2c^2 + 2G_4cc_1 - G_5c \frac{1}{s} = 0. \quad (5.16)$$

din care se obține:

$$c_1 = \frac{G_2c + G_5p}{2G_4}, \quad (5.17)$$

unde s-a introdus notația $p = 1/s$.

Dacă se determină a două curbură din ecuația puterii și se înlocuiesc coeficienții G_j cu expresiile lor funcție de indicele de refracție rezultă următoarea soluție pereche:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{0.5(2n+1)c + 2(n+1)p}{n+2} \\ c_2 = \frac{c[0.5n(2n+1) - (n+2)] + 2(n+1)p}{n+2} \end{cases} \quad \wedge s \neq -\infty. \quad (5.18)$$

Pentru cazul frecvent al distanței obiect infinite se obțin soluțiile particulare:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{n(2n+1)c}{2(n+2)} \\ c_2 = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2n+1)} c_1 \end{cases} \quad \wedge s = -\infty. \quad (5.19)$$

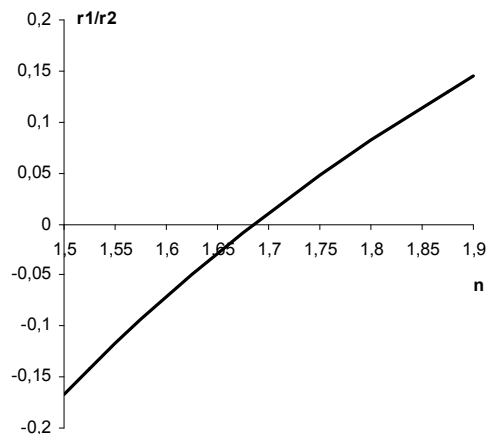


Fig. 5.10 Variația formei pentru lentila echivalentă de cea mai bună formă funcție de indicele de refracție

Studiind sistemul (5.19) se poate face o analiză a celei mai bune forme a lentilei și funcție de indicele de refracție, considerând impuse puterea și curbura

totală. Forma lentilei depinde de raportul și semnul razelor. Din sistemul (5.19) se poate scrie:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2n + 1)} \tag{5.20}$$

O reprezentare grafică intuitivă, conținând variația raportului r_1/r_2 funcție de n (fig. 5.10) relevă faptul că lentila de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice, pentru sticle cu indici de refracție mici este cea biconvexă ($r_1/r_2 < 0$), iar pentru sticle cu indici de refracție mari – formele menisc ($r_1/r_2 > 0$).

Punctul de intersecție al curbei cu axa absciselor corespunde unui indice de refracție $n = 1.68614$, care va determina forma particulară plan-convexă. Acesta poate fi determinat analitic impunând condiția de anulare a raportului (5.20). Soluția care convine pentru ecuația de gradul doi $2n^2 - n - 4 = 0$ este $n = 1.68614$.

Având în vedere faptul că materialele optice utilizate în domeniul IR au indici de refracție mari, în domeniul [2...4], rezultă că, în majoritatea cazurilor lentilele de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice sunt lentilele menisc.

Cunoașterea razelor și a diametrului total permit, în final, determinarea grosimii la centru, respectiv, la margine a lentilelor.

Grosimea la centru a lentilelor convergente, respectiv grosimea la margine a lentilelor divergente se calculează ca sumă algebrică a înălțimilor calotelor sferice din care provin dioptrii (fig. 5.11).

Grosimea la centru d_0 a lentilei convergente se determină pe un criteriu geometric, cu relațiile:

$$d_0 = d_1 + d_2, \tag{5.21}$$

unde: $d_{1,2} = \text{sgn}(d_{1,2}) \left[|r_{1,2}| - \sqrt{r_{1,2}^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right], \tag{5.22}$

$$\text{sgn}(d_{1,2}) = \begin{cases} +1, & \text{pentru suprafețe convexe} \\ -1, & \text{pentru suprafețe concave} \end{cases} \tag{5.23}$$

$d_{1,2}$ – înălțimile calotelor sferice din care provin dioptrii.

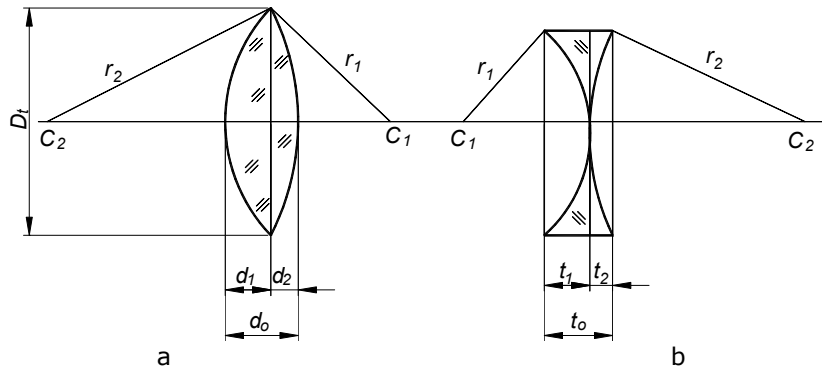


Fig. 5.11 Grosimea limită la centru d_0 , a lentilei convergente (a) și grosimea limită la margine, t_0 , a lentilei divergente (b)

În tabelul 5.3 este explicată formula (5.15) pentru toate tipurile posibile de lentile convergente.

După cum rezultă din figura 5.11.a, grosimea d_0 la centru corespunde unei grosimi la margine nule a lentilei convergente. Muchia vie conduce la tensionarea materialului și riscul de ciobire a piesei la montaj. Din acest motiv, la care se adaugă acela că este necesară o suprafață laterală de așezare a lentilei în montură, la grosimea pe centru d_0 se adaugă grosimea d_{min} impusă pentru marginea lentilei (fig. 5.12).

Tabelul 5.3

Nr.crt.	Tipul lentilei	Expresia grosimii la centru d_0
1	biconvexă ($r_1 > 0, r_2 < 0$)	$d_0 = r_1 - r_2 - \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} + \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$
2	plan-convexă ($r_1 > 0, r_2 = \infty$)	$d_0 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2}$
3	plan-convexă ($r_1 = \infty, r_2 < 0$)	$d_0 = -r_2 - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2}$
4	menisc convergent ($r_1 > 0, r_2 > 0$) ($ r_1 < r_2 $)	$d_0 = r_1 - r_2 - \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$
5	menisc convergent ($r_1 < 0, r_2 < 0$) ($ r_1 > r_2 $)	$d_0 = r_1 + r_2 + \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$

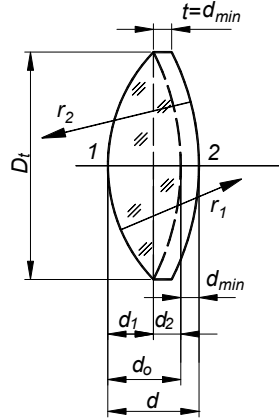


Fig. 5.12 Elementele geometrice care determină grosimea la centru a lentilei convergente

Grosimea la margine t , care se transferă în calculul grosimii la centru cu notația d_{min} , se determină pe baza unui criteriu tehnologic, conform căruia:

$$d_{min} = t = 0.05D_t, \quad (5.24)$$

unde D_t este diametrul total al lentilei sau se poate admite urmând recomandările din tabelul 5.4.

Grosimea totală la centru, corespunzătoare celor două criterii – geometric și tehnologic - este:

$$d = d_{\min} + d_0 = d_{\min} + d_1 + d_2 . \tag{5.25}$$

Forma lentilei convergente se consideră corespunzătoare dacă este îndeplinită condiția de verificare:

$$4d + 10d_{\min} \geq D_t . \tag{5.26}$$

În caz contrar, este necesară modificarea valorii d_{\min} .

Tabelul 5.4

D_t [mm]	d_{\min} [mm]	
	Lentila convergentă	Lentila divergentă
6...10	0.6	-
10...18	1.0	1.0
18...30	1.5	1.5
30...50	2.0	2.2
50...80	3.0	3.8
80...120	4.0	5.8
120...150	5.0	7.5

Lentila divergentă are grosimea la centru d_{\min} , admisă conform tabelului 5.4 sau calculată funcție de diametrul total:

$$d_{\min} = 0,03D_t . \tag{5.27}$$

Grosimea la margine a lentilei divergente se determină analog grosimii la centru a lentilei convergente și reprezintă o sumă de trei termeni: înălțimile calotelor sferice corespunzătoare dioptrilor t_1, t_2 și grosimea minimă la centru d_{\min} :

$$t = d_{\min} + t_0 , \quad t_0 = t_1 + t_2 , \tag{5.28}$$

$$\text{unde } t_{1,2} = \text{sgn}(t_{1,2}) \left[|r_{1,2}| - \sqrt{r_{1,2}^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right] , \tag{5.29}$$

$$\text{sgn}(t_{1,2}) = \begin{cases} +1, & \text{pentru suprafețe concave} \\ -1, & \text{pentru suprafețe convexe} \end{cases} . \tag{5.30}$$

În tabelul 5.5 este explicitată grosimea t_0 dedusă din criteriul geometric pentru toate formele constructive ale lentilelor divergente.

Tabelul 5.5

Nr.crt.	Tipul lentilei	Expresia grosimii la margine t_0
1	biconcavă ($r_1 < 0, r_2 > 0$)	$d_0 = -r_1 + r_2 - \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} + \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$
2	plan-convexă ($r_1 < 0, r_2 = \infty$)	$d_0 = -r_1 - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2}$
3	plan-convexă ($r_1 = \infty, r_2 > 0$)	$d_0 = r_2 - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2}$
4	menisc divergent ($r_1 > 0, r_2 > 0$) ($ r_1 > r_2 $)	$d_0 = -r_1 + r_2 + \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$
5	menisc divergent ($r_1 < 0, r_2 < 0$) ($ r_1 < r_2 $)	$d_0 = -r_1 + r_2 - \left(\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{D_t}{2}\right)^2} \right)$

Definitivarea formei lentilei divergente se face după verificarea relației:

$$3t + 12d_{\min} \geq D_t. \quad (5.31)$$

În cazul în care relația (5.31) nu este satisfăcută, se majorează d_{\min} .

Reducerea sau eliminarea totală a aberației sferice se poate realiza și prin utilizarea suprafețelor asferice. Dioptrii asferici utilizați cel mai frecvent sunt calote de elipsoid, hiperboloid (cu una sau două pânze) sau paraboloid. Suprafețele 3D au caracter de revoluție și au ca generatoare o conică de tipul elipsă, hiperbolă sau parabolă, iar axa de revoluție coincide cu axa optică.

În tabelul 5.6 sunt sintetizate formele matematice în care sunt utilizate curbele plane cuadrice în domeniul optic.

Tabelul 5.6

Suprafața	Semiaxe	k	z	r _o
Sferă	a = b = r _o	k = 0	$z = r_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{r_0^2}} \right)$	$r_0 = \frac{y^2 + z^2}{2z}$
Parabolă		k = -1	$z = \frac{y^2}{2r_0}$	$r_0 = \frac{y^2}{2z}$
Elipsă	b < a	-1 < k < 0	$z = \frac{r_0 \left(1 - \sqrt{1 - (k+1) \frac{y^2}{r_0^2}} \right)}{k+1}$	$r_0 = \frac{b^2}{a}$
	b > a	k > 0		
Hiperbolă	b ≥ a	k < -1		

În tabelul 5.5 s-a notat cu k caracteristica principală a conice, numită excentricitate și definită în raport cu semiaxele curbei:

$$k = \frac{b^2}{a^2} - 1, \quad (5.32)$$

unde a este semiaxa în sensul axei Sz, iar b semiaxa în sensul axei Sy. Ecuațiile curbelor z(y) sunt exprimate în raport cu un sistem de axe cartezian având originea în vârful S al dioptrului și axa z orientată de-a lungul axei optice. Cu r_o s-a notat raza cercului tangent la curbă în vârful dioptrului.

Pentru corectarea aberației sferice există două forme tradiționale de lentile asferice:

- Lentila plan convexă cu suprafață hiperbolică

Lentila este complet lipsită de aberație sferică pentru abscisă obiect infinită. Are un dioptru plan și unul de formă hiperbolică (fig. 5.13), pentru care se alege excentricitatea $k = -n^2$.

Geometria lentilei și caracteristicile optice sunt legate prin relațiile:

$$r_0 = -f'(n-1), \quad k = -n^2, \quad s_H = \frac{d}{n}, \quad s_H' = 0. \quad (5.33)$$

Două astfel de lentile lipite pe fețele plane constituie o lentilă hiperbolică biconvexă, fără aberație sferică și având $\beta = -1$. Pentru mărire liniară diferită de unitate lentilele se aleg cu distanțe focale diferite.

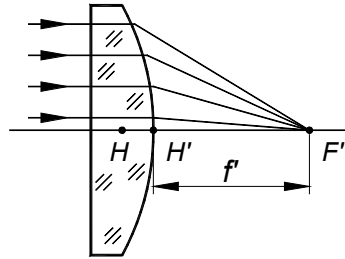


Fig. 5.13 Lentila plan-convexă cu suprafață hiperbolică

- Lentila menisc cu o suprafață eliptică
Lentila menisc asferică (fig. 5.14), are prima suprafață eliptică, iar a doua sferică, având centrul de curbură în vârful suprafeței sferice ($r_2 = s'_2 = f' - d$).

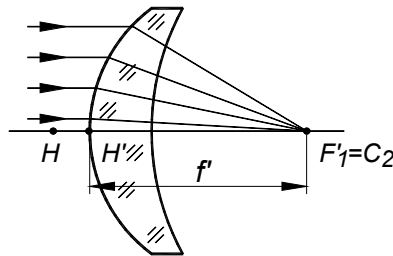


Fig. 5.14 Lentila menisc cu o suprafață eliptică

Pentru suprafața eliptică se alege excentricitatea $k = -1/n^2$, iar raza cercului tangent la vârful dioptrului devine:

$$r_0 = \frac{f'(n-1)}{n}. \quad (5.34)$$

Punctul principal imagine al lentilei se află în vârful primului dioptru ($s'_{H'} = -d$), ceea ce face ca suprafața sferică să nu aibă efect optic.

Cunoașterea razei r_0 este importantă pentru că în domeniul gaussian lentilele asferice sunt tratate matematic identic celor sferice și, ca urmare, caracteristicile de referință ale lentilei asferice se determină utilizând formalismul matematic al opticii de ordinul I, dedus pentru dioptrii sferice.

5.3 Materiale specifice componentelor optice utilizate pentru laseri cu CO₂ care emit pe lungimea de undă de 10.6 μm

Radiația cu lungimea de undă de 10.6μm se află în domeniul infraroșu mediu (2.5...50)μm. Alegerea materialelor pentru componentele sistemelor optice care sunt traversate de radiații cu anumite lungimi de undă are la bază două criterii:

- transmitanța cât mai ridicată, respectiv absorbanța spectrală minimă
- efecte termice minime, la impactul energetic al radiației, astfel încât să fie asigurate în cât mai mare măsură stabilitatea proprietăților optice, mecanice și geometrice.

Sticlele optice tradiționale sunt transparente cu precădere în domeniul vizibil, dar au transmitanțe acceptabile și în domeniul infraroșu apropiat. Energia radiației în aceste domenii nu ridică probleme deosebite în privința efectelor termice asupra sticlelor. În cazul puterilor mari pot totuși apărea probleme, pentru care există deja soluții devenite clasice, pentru înlăturarea efectelor termice (filtre calorice, oglinzi reci, sisteme de răcire specifice).

Pentru sistemele optice care lucrează cu radiație de lungime de undă având ca ordin de mărime zecile de μm și care, în general transportă și transformă fascicule provenite de la surse laser, materialele utilizate pentru componentele optice sunt alese cu această destinație specială. Ele trebuie să asigure atât transparența ridicată, cât și reacție cât mai neutră la creșterea temperaturii.

În tabelul 5.7 sunt prezentate sintetic proprietățile celor mai performante materiale optice destinate utilizării în sistemele optice asociate laserilor cu CO₂, care lucrează la lungimea de undă de 10.6 μm .

Tabelul 5.7

Material	Proprietăți optice			Proprietăți termice		Proprietăți mecanice		
	$\alpha_{10.6\mu\text{m}}$ [cm ⁻¹]	$n_{10.6\mu\text{m}}$ [-]	$dn/dT_{10.6\mu\text{m}}$ [x10 ⁻⁶ /°C]	Cond. termica la 20°C [W/cm/°C]	Coef. dilatație liniară la 20°C [x10 ⁶ /°C]	E [GPa]	Duritate [Knoop]	Densitate [g/cm ³]
ZnSe	0.0005	2.403	61	0.18	7.57	67.2	105-120	5.27
ZnS	0.24	2.192	41	0.167	6.8	74.5	210-240	4.08
ZnS(Ms)*	0.20	2.192	-	0.272	6.5	85.5	150-160	4.09
CdTe	0.0018	2.674	107	0.062	5.9	37.2	45	5.85
GaAs	0.01	3.275	149	0.48	5.6	83.0	750	5.31
Ge	0.03	4.003	408	0.59	6.0	100.0	692	5.32
Si	1.5	3.418	160	1.56	2.56	131.0	1150	2.33
NaCl	0.00045	1.491	-22	0.065	44.0	40.0	18.2	2.16
KCl	0.00014	1.455	-33	0.065	36.0	30.0	7.2-9.3	1.98
KBr	0.00014	1.525	-26	0.029	43.0	27.01	5.9-7.0	2.75
KRS-5	0.005	~2.37	-99	0.0054	58.0	16.00	40	7.37
Amtir-1	0.02	2.492	77	0.0025	13.0	22.05	170	4.40
Al ₂ O ₃	-	1.72	15	0.46	5.8	339.8	1400	3.97
Cuarț**	-	1.45	10	0.014	0.55	73.06	600	2.20
Diamant	0.12	2.375	9.60	20.00	0.80	1050.0	9000	3.51

*) Sulfura de zinc cu utilizare multispectrală

***) Cuarț cu destinație specială numai pentru domeniul infraroșu

ZnSe reprezintă materialul cel mai utilizat pentru lentilele obiectivelor de focalizare, a expandoarelor și a ferestrelor de protecție, datorită transmittanței ridicate (absorbantă foarte scăzută). În figura 5.15 este prezentată curba transmittanței spectrale a ZnSe.

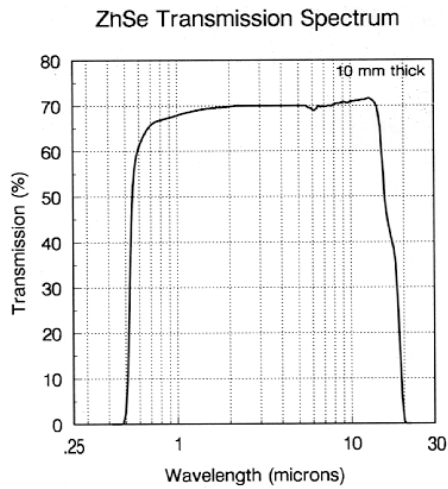


Fig. 5.15 Curba de transmitanță spectrală a ZnSe

Se observă valoarea ridicată a coeficientului de transmisie ($\tau > 70\%$) pe un domeniu spectral larg, care include și domeniul vizibil, ceea ce facilitează în mod deosebit alinierea sistemelor optice. Pentru receptorul natural – ochiul – sensibil numai în domeniul vizibil ZnSe are aspectul unui filtru de absorbție galben (fig. 5.16). Materialul este non-higroscopic, stabil chimic (este atacat numai de acizii puternici), astfel încât poate fi utilizat în aplicații de laborator, industriale sau care se desfășoară în mediul natural, fără necesitatea unor construcții speciale de protecție.



Fig. 5.16 Lentile fabricate din ZnSe

Din punct de vedere optic, ZnSe este relativ stabil și în raport cu temperatura. Variația indicelui de refracție este în medie de $\sim 6 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (tab. 5.8).

Tabelul 5.8

Temperatura [°C]	$dn/dT \times 10^5 / ^\circ\text{C}$ la $\lambda = 10.5 \mu\text{m}$
-180	4.9
-160	5.1
-140	5.4
-120	5.5
-100	5.7
-80	5.8
-60	5.9
-40	6.0
-20	6.0
0	6.1
20	6.1
40	6.1
60	6.1
80	6.2
100	6.2
120	6.3
140	6.3
160	6.4
180	6.6
200	6.7

ZnSe admite o densitate de putere de până la 100W/cm² și o temperatură maximă de lucru de până la 250°C, de la care începe procesul de ambalare termică.

Sulfura de zinc, ZnS, reprezintă, de asemenea, un material utilizat preferențial în construcția tuturor tipurilor de componente optice, care lucrează în infraroșu. Materialul, un cristal artificial obținut prin vaporizare și depunere în vid, este utilizat cu precădere în domeniile [3...5] μm și [8...12] μm, în care prezintă transmittanță maximă (>70%). La 10.6 μm transmittanța are valoarea cea mai ridicată (~75%), după cum rezultă din figura 5.17.

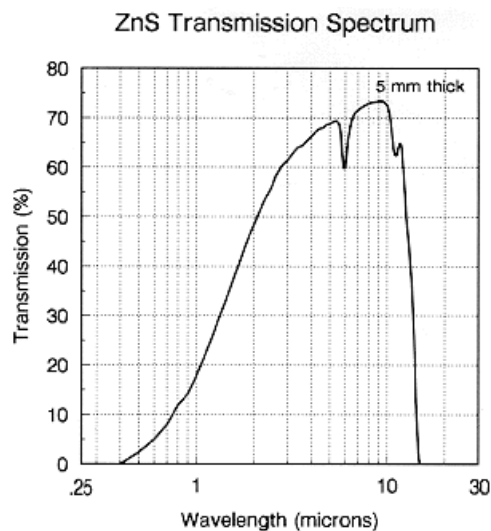


Fig. 5.17 Transmittanța spectrală a ZnS

Transparența, chiar la valori reduse, în domeniul vizibil permite alinierea facilă a sistemului optic. Valoarea scăzută a transmitanței în vizibil conferă pieselor un caracter semiopac (fig. 5.18).



Fig. 5.18 Piese optice confecționate din ZnS

ZnS are proprietăți mecanice și durabilitate deosebite datorită rezistenței la rupere și duritate ridicate, rezistenței la acțiunea apei, la abraziunea particulelor de praf. Din aceste motive este deseori un material preferat pentru aplicațiile militare, cele cu funcționare în aer liber sau se regăsește în construcția ferestrelor de protecție, indiferent de destinația aplicației. ZnS are un preț relativ scăzut în raport cu ZnSe, care este un material foarte scump. Dintre toate materialele optice utilizate în construcția sistemelor laser, ZnS admite cea mai ridicată valoare a densității de putere ($\sim 1000\text{W}/\text{cm}^2$) și, practic, nu dezvoltă fenomenul de ambalare termică. De fapt, prezintă și cea mai ridicată temperatură de topire ($1830\text{ }^\circ\text{C}$ față de $1526\text{ }^\circ\text{C}$ pentru ZnSe).

Sulfura de zinc, în varianta multispectrală, este un cristal artificial, obținut prin presare la temperaturi ridicate, procedeu tehnologic care practic elimină defectele la nivel de rețea cristalină. Materialul care rezultă are o transparență ridicată pe un domeniu spectral foarte larg (fig. 5.19).

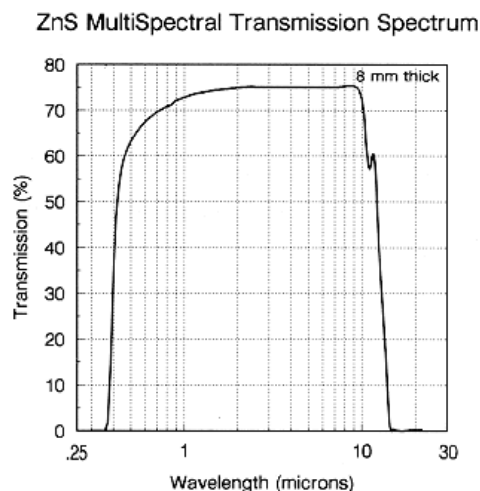


Fig. 5.19 Transmitanța spectrală a sulfurii de zinc multispectrale

Transmitanța de peste 60% în domeniul vizibil îi conferă un aspect transparent și clar (fig. 5.20).

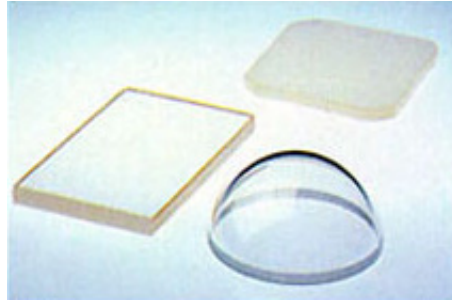


Fig. 5.20 Piese optice prelucrate din sulfură de zinc multispectrală

Materialul este destinat, cu precădere, aplicațiilor care utilizează radiație policromatică, cu extindere spectrală largă.

Germaniul, ca material cristalin artificial, este utilizat pentru componente optice (lentile, ferestre, suport pentru oglinzi) în domeniul [2...12] μm (fig. 5.21). Absorbanța ridicată (~ 0.03) determină o transparență relativ redusă în raport cu alte materiale utilizate în același domeniu. Transmitanța este, de asemenea, puternic dependentă de temperatură și prezintă o scădere cu pantă accentuată peste 150°C. Deși are o conductivitate termică bună, modificarea proprietăților optice în raport cu temperatura, limitează utilizarea Ge la aplicații laser cu puteri de până la 100 W. Temperatura de ambalare termică este aproximativ 70°C, iar densitatea de putere admisă de $\sim 2000 \text{ W/cm}^2$.

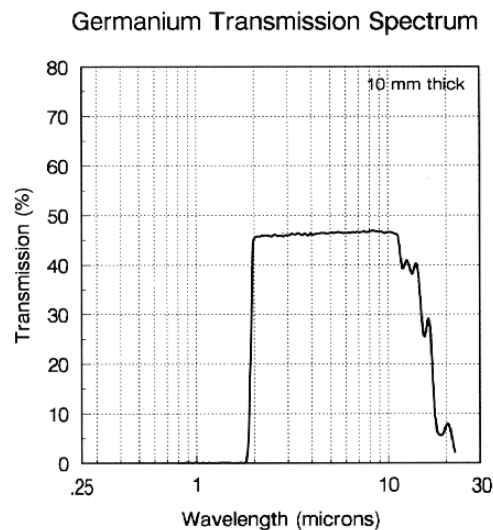


Fig. 5.21 Transmitanța spectrală a Ge

Ge este non-higroscopic și are caracteristici mecanice bune. În domeniul vizibil este total absorbant, astfel încât are un aspect perfect opac (fig. 5.22).

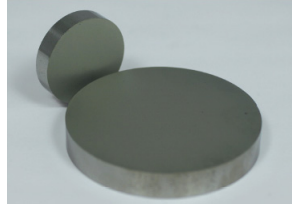


Fig. 5.22 Componente optice prelucrate din cristale de Ge

GaAs reprezintă o alternativă pentru ZnSe în aplicațiile laser de mare putere, pentru construcția lentilelor și oglinzilor. De asemenea, GaAs este o alegere corectă pentru aplicații la care durabilitatea, rezistența mecanică și duritatea sunt importante. Materialul este non-higroscopic, rezistent la agenți chimici, cu excepția acizilor puternici. Tehnologia de creștere a cristalelor limitează însă dimensiunile semifabricatelor la diametrul de 10 cm.

Transmitanța materialului este de ~55% pe un domeniu relativ restrâns, (1...15) μm – fig. 5.23.

În vizibil este complet opac (fig. 5.24). GaAs intră în ambalare termică la cca. 300 °C și suportă o densitate de putere de până la 500W/cm².

Gallium Arsenide Transmission Spectrum

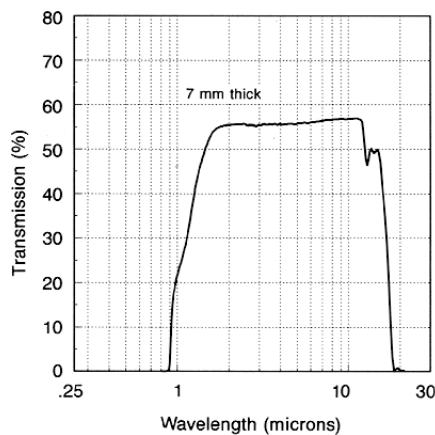


Fig. 5.23 Transmitanța spectrală a GaAs

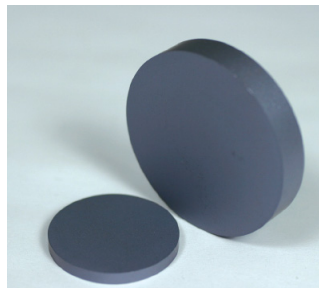


Fig. 5.24 Componente optice prelucrate din GaAs

CdTe are o transmittanță relativ ridicată pe un domeniu larg, care acoperă infraroșul apropiat și mediu (fig. 5.25). În vizibil, este total opac (fig. 5.26). Deși are absorbantă scăzută, conductivitatea termică scăzută limitează utilizarea materialului la densități de putere sub 500 W/cm² și temperaturi de regim de 200 °C.

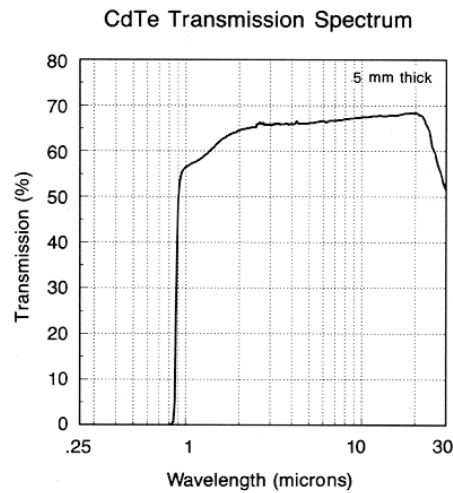


Fig. 5. 25 Transmittanța spectrală a CdTe

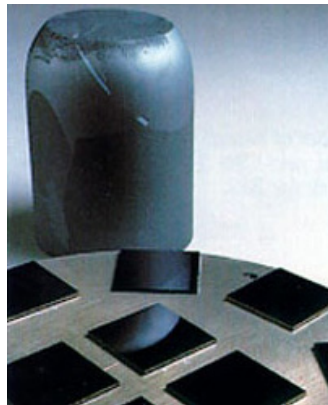


Fig. 5.26 Semifabricate din CdTe

Grupa sărurilor cristaline, incluzând NaCl, KCl, KBr și KRS-5 (bromiodură de tahliu), deși prezintă cele mai scăzute valori ale coeficientului de absorbție și, ca urmare, au transmittanța cea mai ridicată în raport cu toate celelalte materiale, are o utilizare limitată datorită caracterului foarte higroscopic (care impune atașarea unor subansambluri de climatizare continuă) și a caracteristicilor mecanice foarte slabe.

Cuarțul, safirul și diamantul sunt utilizate pentru prelucrarea unor componente speciale, ale căror suprafețe nu prezintă simetrie de rotație (lentile biconice, matrici de lentile sau oglinzi, oglinzi asferice etc.).

5.4 Proiectarea optimă a sistemului optic asociat echipamentului de prelucrare laser cu CO₂, prin soft dedicat

5.4.1 Formularea cerințelor aplicației și predimensionarea sistemului

Se urmărește proiectarea unui sistem optic asociat unui echipament de tăiere a roților dințate cilindrice din policarbonat. Proprietățile fizice, mecanice, termice și electrice ale materialului prelucrat sunt sintetizate în tabelul 5.9. Dintre aceste proprietăți în mod deosebit interesează temperatura de înmuiere și cea de topire.

Sursa de radiație utilizată este un laser cu CO₂, care emite la lungimea de undă de 10.6 μm, un fascicul cu diametrul de 21 mm, la o putere reglabilă până la 2kW.

Tabelul 5.9

Proprietăți fizice	
Densitate	1200 - 1220 kg/m ³
Indice de refracție	1.584
Proprietăți mecanice	
E	2-2.4 GPa
σ _r	55-75 MPa
σ _c	>80 MPa
ε _r	80-150%
v	0.37
HRC	70
Proprietăți termice	
Temperatura de topire	267 °C
Temperatura de înmuiere	150 °C
Temperatura de utilizare	115 - 130 °C
α	65 - 70x10 ⁻⁶ /°C
Căldura specifică	1.2 - 1.3 kJ/kg °C
Conductivitate termică la 23 °C	0.21 W/m ² °C
Proprietăți electrice	
ε	2.568 x 10 ⁻¹¹ F/m
μ	1.089 μN/A ²
Rezistență la agenți chimici	
Acizi concentrați	slabă
Acizi diluați	bună
Alcoolii	bună
Alcaloizi	bună
Hidrocarburi aromatice	slabă
Unsori și ulei	bună
Halogeni	slabă
Cetone	slabă
Proprietăți economice	
Preț	5 - 9 €/kg

Pentru prelucrarea policarbonatului este suficientă o putere medie, pentru care se alege valoarea P = 500 W.

Conform notațiilor din figura 5.1, deschiderea fasciculului incident D' este de 21 mm. Pe prima lentilă a expandorului, L₁, densitatea de putere va fi:

$$P_{L1} = \frac{P}{\frac{\pi D'^2}{4}} = \frac{500}{\frac{\pi 21^2}{4}} = 1.44 \text{ W / mm}^2, \quad (5.35)$$

unde cu P_{L1} s-a notat densitatea de putere pe prima lentilă.

Pentru lentila L_1 se alege ca material ZnS, pe criterii energetice ($1.44 \ll 10$ W/mm²) și optice ($\tau > 70\%$).

Lentilele L_2 și L_3 au aceeași deschidere, D și, practic, trebuie să suporte aceeași densitate de putere. Pentru construcția lor se alege cel mai performant material din toate punctele de vedere, ZnSe. Considerând o densitate de putere medie de 0.5W/mm² rezultă o apertură:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi P_{L2,3}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 500}{\pi \cdot 0.5}} \cong 36 \text{ mm}. \quad (5.36)$$

Se obține un coeficient de expandare necesar:

$$\Gamma = \frac{D}{D'} = \frac{21}{36} \cong 1.7. \quad (5.36)$$

Conform recomandării (5.6) focala optimă a obiectivului este:

$$f' = 3 \sqrt{\frac{\pi k D^4}{2 \lambda M^2}} = 3 \sqrt{\frac{\pi \cdot 0.0187 \cdot 36^4}{2 \cdot 10.6 \cdot 10^{-3} \cdot 1}} \cong 167 \text{ mm}, \quad (5.37)$$

iar numărul de deschidere al obiectivului are valoarea:

$$f / \# = \frac{f'}{D} = \frac{167}{36} \cong 4.6. \quad (5.38)$$

Mărimile estimative ale diametrului spotului și profunzimea focarului (la o creștere cu 5% a secțiunii causticii) vor fi:

$$d_{\text{spot}} = \frac{4 \lambda M^2 f'}{\pi D} + \frac{k D^3}{f'^2} = \frac{4 \cdot 10.6 \cdot 1 \cdot 167}{\pi \cdot 36} + \frac{0.0187 \cdot 36^3 \cdot 10^3}{167^2} \cong 94 \mu\text{m}, \quad (5.39)$$

$$PF = \frac{8 \lambda M^2}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{f'}{D} \right)^2 = \frac{8 \cdot 10.6 \cdot 1}{\pi} \sqrt{1.1^2 - 1} (4.6)^2 \cong 262 \mu\text{m}. \quad (5.40)$$

Urmează sinteza lentilelor și analiza sistemului real, pentru determinarea caracteristicilor exacte ale spotului și adâncimii focarului.

În scopul efectuării calculului de gabarit și al sintezei lentilelor, cu introducerea posibilității variației unor parametri de intrare în scopul optimizării sistemului rezultat, s-a întocmit un program automat de calcul, care este prezentat în continuare.

5.4.2 Soft dedicat calculului de gabarit și sintezei componentelor sistemului optic

Aplicația Microsoft Visual Basic conține un modul *Form* și un modul *Code* aferent execuției programului.

Modulul *Form* este prezentat în figura 5.27. Aplicația este intitulată *Calculul sistemului optic asociat prelucrărilor cu laser* și conține câteva *Frame*-uri, care înglobează controale de date asociate logic și cronologic. *Frame*-ul *Date de proiectare* este completat de către utilizator cu valori numerice în *Casete Text* a căror semnificație este indicată prin *Etichete* aliniate casetelor text. Ca date de intrare s-au stabilit: puterea laserului, diametrul fascicului emis de sursa laser, lungimea aproximativă a expandorului și abaterea procentuală a secțiunii causticii pentru care se estimează profunzimea focarului. *Frame*-ul *Sticle optice* conține trei controale *Data* conectate la baze de date cu materiale utilizate în aplicațiile laser în IR. În subsolul fiecărui control *Data*, în casete text, cu etichete explicative sunt extrase din baza de date câmpurile corespunzătoare sortului, indicelui de refracție la

10.6μm, densitatea de putere maximă admisibilă și coeficientul de material k. Alegerea materialelor revine, de asemenea operatorului.

În jumătatea inferioară a interfeței grafice, este inserat un control *Picture*, care conține schema optică a sistemului optic asociat prelucrărilor cu laser. Pe schemă sunt indicate mărimile optice caracteristice, cu simboluri care pot fi identificate în *Frame*-urile cu rezultate ale calculului.

Butonul de comandă *CALCUL* declanșează secvența de cod aferentă calculului și afișării rezultatelor, la evenimentul *Click()*.

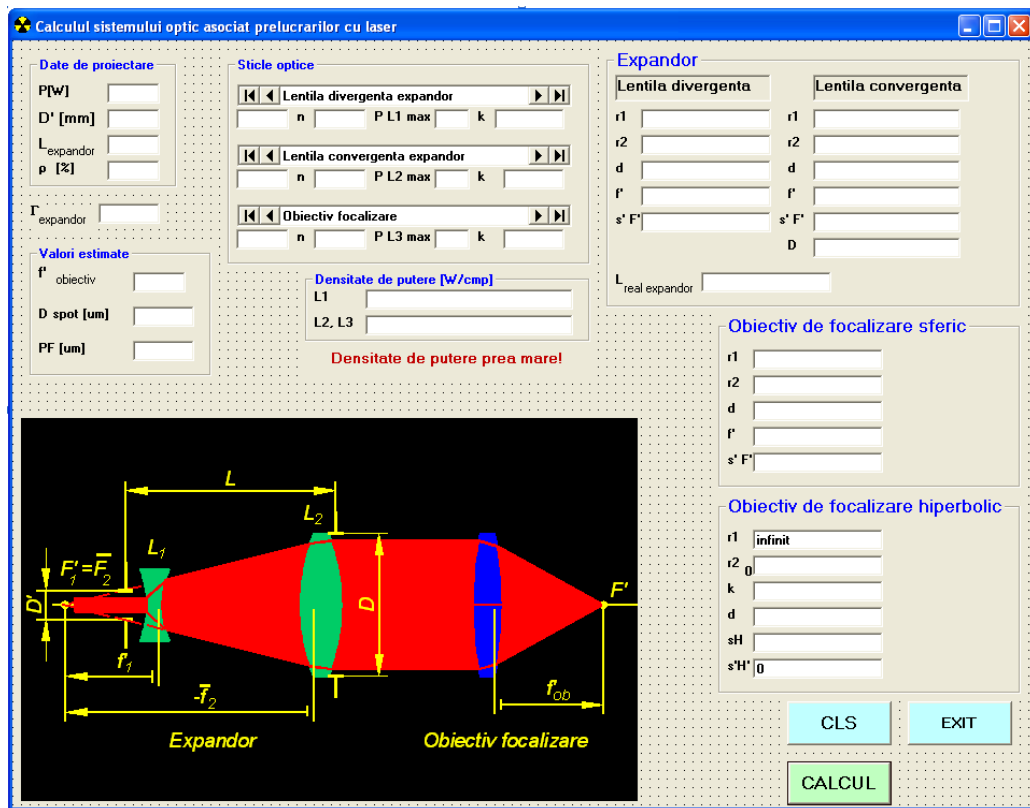


Fig. 5.27 Modulul *Form* al aplicației Visual Basic

Comanda *CALCUL* începe prin verificarea corectitudinii alegerii materialelor. Sunt determinate densitățile de putere aferente celor trei lentile (valorile rezultate sunt afișate în *Frame*-ul *Densitate de putere*) și sunt comparate cu cele admisibile.

Pentru prima lentilă densitatea de putere este:

$$P_{L1} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4}} \tag{5.41}$$

Dacă densitatea de putere efectivă depășește valoarea maximă admisă, devine vizibilă eticheta *Densitatea de putere prea mare!*, care în modul *Default* este setată cu proprietatea *Visible = False*, programul se oprește din execuție, iar operatorul trebuie să selecteze alt sort de material.

Se calculează apertura obiectivului:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi P_{L2,3}}}, \quad (5.42)$$

unde $P_{L2,3}$ reprezintă densitățile de putere maxime admise, la care s-a aplicat un coeficient de siguranță egal cu 2. Urmează calculul coeficientului de expandare, a focalei obiectivului, a diametrului spotului și a profunzimii focarului, conform relațiilor (5.36), (5.37), (5.39) și (5.40). Valorile rezultate pot fi vizualizate în *Frame-ul Valori estimate*. Calculul de gabarit al expandorului furnizează distanțele focale ale lentilei divergente, respectiv convergente, conform relațiilor (5.8) și (5.9).

Pentru sinteza celor trei lentile s-a apelat la algoritmul care vizează obținerea lentilelor de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice (rel. 5.19, 5.22, 5.23, 5.28, 5.29, 5.30). Adaosul de montaj a fost prevăzut pentru toate lentilele la valoarea de 2 mm.

În *Frame-ul intitulat Expandor* sunt redată mărimile geometrice și optice caracteristice lentilei divergente și convergente componente. Caracteristicile optice de referință s-au determinat pe baza unei drumuri paraxiale care conduce la relațiile:

$$f' = \frac{n}{n-1} \frac{r_1 r_2}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)}, \quad (5.43)$$

$$s_{F'} = r_2 \frac{nr_1 - (n-1)d}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]}. \quad (5.44)$$

Distanța dintre lentilele expandorului etichetată ca $L_{\text{real expandor}}$ s-a calculat pe criterii geometrice:

$$L_{\text{real expandor}} = -s_{F'L2} + s'_{F'L1}. \quad (5.45)$$

Datele rezultate din sinteza lentilei obiectivului sunt grupate în *Frame-ul Obiectiv de focalizare sferic*. Pentru această componentă s-a luat în considerare și o variantă asferică și anume o lentilă plan hiperbolică, a cărei sinteză este programată conform relațiilor (5.33).

Butonul de comandă CLS golește locațiile de memorie atribuite variabilelor apelate în execuția programului și șterge conținutul casetelor de text, pregătind interfața grafică pentru o nouă aplicație.

Butonul de comandă EXIT asigură închiderea programului.

Codul aplicației, descris odată cu controalele aferente, este redat mai jos.

```
Dim gama As Single
Dim Dprim As Integer
Dim L As Single
Dim fob As Single
Dim nd As Single
Dim nc As Single
Dim no As Single
Dim fd As Single
Dim fc As Single
Dim P As Single
```

```
Private Sub Command1_Click()
P = Val(Text37)
ro = Val(Text45)
```



```

Dprim = Val(Text8)
L = Val(Text10)
nd = Val(Text1)
nc = Val(Text2)
no = Val(Text4)
`verificarea densității de putere admisibile pe lentila L1
PL1 = P / 3.1416 / Dprim ^ 2 * 4: Text38.Text = Round(PL1, 2)
If PL1 > Val(Text34) Then
Label49.Visible = True
End If
`calculul aperturii obiectivului
d = Sqr(4 * P / 3.1416 / Val(Text36) * 2)
Text27.Text = Round(d, 0)
`verificarea densității de putere admisibile pe lentilele L2 si
L3
PL3 = P / 3.1416 / d ^ 2 * 4: Text39.Text = Round(PL3, 2)
If PL3 > Val(Text36) Then
Label49.Visible = True
End If
`calculul coeficientului de expansiune
gama = d / Dprim: Text7.Text = Round(gama, 1)
`calculul focalei obiectivului
fob = (3.1416 * Val(Text44) * d ^ 4 * 1000 / 2 / 10.6) ^ 0.33:
Text9.Text = Round(fob, 0)
`diametrul spotului
dspot = 4 * 10.6 * fob / 3.1416 / d + d ^ 3 * Val(Text44) / fob
^ 2: Text40.Text = Round(dspot, 0)
`profundimea focarului
PF = 8 * 10.6 / 3.1416 * Sqr((1 + ro) ^ 2 - 1) * (fob / d) ^ 2:
Text41.Text = Round(PF, 0)
`calculul de gabarit al expandorului
fd = -L / (gama - 1)
fc = gama * L / (gama - 1)
`sinteza lentilelor expandorului
cd = 1 / (nd - 1) / fd
cc = 1 / (nc - 1) / fc
c1d = nd * (2 * nd + 1) * cd / 2 / (nd + 2)
c2d = c1d * (2 * nd ^ 2 - nd - 4) / nd / (2 * nd + 1)
r1d = 1 / c1d: Text11.Text = Round(r1d, 2)
r2d = 1 / c2d: Text12.Text = Round(r2d, 2)
Text13.Text = 2
fprimd = nd / (nd - 1) * r1d * r2d / (nd * (r2d - r1d) + 2 * (nd
- 1)): Text20.Text = Round(fprimd, 2)
sprimd = r2d * (nd * r1d - (nd - 1) * 2) / (nd - 1) / (nd * (r2d
- r1d) + (nd - 1) * 2): Text21.Text = Round(sprimd, 2)
c1c = nc * (2 * nc + 1) * cc / 2 / (nc + 2)
c2c = c1c * (2 * nc ^ 2 - nc - 4) / nc / (2 * nc + 1)
r1c = 1 / c1c: Text14.Text = Round(r1c, 2)
r2c = 1 / c2c: Text15.Text = Round(r2c, 2)
If r1c > 0 And r2c < 0 Then
dc = 2 + r1c - r2c - (Sqr(r1c ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) + Sqr(r2c ^
2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text16.Text = Round(dc, 1)
End If
If r1c > 0 And r2c > 0 Then

```

```

    dc = 2 + r1c - r2c - (Sqr(r1c ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) - Sqr(r2c ^
2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text16.Text = Round(dc, 1)
    End If
    If r1c < 0 And r2c < 0 Then
    dc = 2 + r1c + r2c - (Sqr(r1c ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) - Sqr(r2c ^
2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text16.Text = Round(dc, 1)
    End If
    fprimc = nc / (nc - 1) * r1c * r2c / (nc * (r2c - r1c) + dc *
(nc - 1)): Text22.Text = Round(fprimc, 2)
    sprimc = r2c * (nc * r1c - (nc - 1) * dc) / (nc - 1) / (nc *
(r2c - r1c) + (nc - 1) * dc): Text23.Text = Round(sprimc, 2)
    sfc = -r1c * (nc * r2c - (nc - 1) * dc) / (nc - 1) / (nc * (r2c
- r1c) + (nc - 1) * dc)
    `calculul distantei dintre lentilele expandorului
    Lreal = -sfc + sprimd: Text24.Text = Round(Lreal, 1)
    `sinteza lentilei obiectivului
    co = 1 / (no - 1) / fob
    c1o = no * (2 * no + 1) * co / 2 / (no + 2)
    c2o = c1o * (2 * no ^ 2 - no - 4) / no / (2 * no + 1)
    r1o = 1 / c1o: Text17.Text = Round(r1o, 2)
    r2o = 1 / c2o: Text18.Text = Round(r2o, 2)
    If r1o > 0 And r2o < 0 Then
    dob = 2 + r1o - r2o - (Sqr(r1o ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) + Sqr(r2o
^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text19.Text = Round(dob, 1)
    End If
    If r1o > 0 And r2o > 0 Then
    dob = 2 + r1o - r2o - (Sqr(r1o ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) - Sqr(r2o
^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text19.Text = Round(dob, 1)
    End If
    If r1o < 0 And r2o < 0 Then
    dob = 2 + r1o + r2o - (Sqr(r1o ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4) - Sqr(r2o
^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4)): Text19.Text = Round(dob, 1)
    End If
    fprimob = no / (no - 1) * r1o * r2o / (no * (r2o - r1o) + dob *
(no - 1)): Text25.Text = Round(fprimob, 2)
    sprimob = r2o * (no * r1o - (no - 1) * dob) / (no - 1) / (no *
(r2o - r1o) + (no - 1) * dob): Text26.Text = Round(sprimob, 2)
    rob = -fob * (no - 1): Text29.Text = Round(rob, 2)
    `calculul variantei asferice a lentilei obiectivului
    k = -no ^ 2: Text30.Text = Round(k, 2)
    dobasf = 2 - rob - Sqr(rob ^ 2 - (d + 2) ^ 2 / 4): Text31.Text =
Round(dobasf, 1)
    shasf = dobasf / no: Text32.Text = Round(shasf, 2)
    End Sub
-----
`CLS
Private Sub Command3_Click()
gama = Empty
Dprim = Empty
L = Empty
fob = Empty
nd = Empty
nc = Empty
no = Empty
fd = Empty

```

```
fc = Empty
d = Empty
fd = Empty
fc = Empty
cd = Empty
cc = Empty
c1d = Empty
c2d = Empty
r1d = Empty
r1c = Empty
c1c = Empty
c2c = Empty
r1c = Empty
r2c = Empty
fprimd = Empty
sprimd = Empty
fprimc = Empty
sprimc = Empty
sfc = Empty
Lreal = Empty
dc = Empty
dob = Empty
co = Empty
c1o = Empty
c2o = Empty
r1o = Empty
r2o = Empty
fprimob = Empty
sprimob = Empty
rob = Empty
k = Empty
dobasf = Empty
shasf = Empty
ro = Empty
PF = Empty
dspot = Empty
PL1 = Empty
PL3 = Empty
Text7.Text = ""
Text8.Text = ""
Text9.Text = ""
Text10.Text = ""
Text11.Text = ""
Text12.Text = ""
Text13.Text = ""
Text20.Text = ""
Text21.Text = ""
Text14.Text = ""
Text15.Text = ""
Text16.Text = ""
Text17.Text = ""
Text18.Text = ""
Text19.Text = ""
Text22.Text = ""
Text23.Text = ""
```

```

Text25.Text = ""
Text26.Text = ""
Text27.Text = ""
Text24.Text = ""
Text29.Text = ""
Text30.Text = ""
Text31.Text = ""
Text32.Text = ""
Text37.Text = ""
Text38.Text = ""
Text39.Text = ""
Text40.Text = ""
Text45.Text = ""
Text41.Text = ""
End Sub

```

```

'Exit
Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

```

Aplicația a fost rulată pentru datele de intrare stabilite în paragraful anterior. În figura 5.28 este redată o imagine a interfeței grafice după execuția programului, astfel încât pot fi urmărite toate datele sistemului optic rezultat.

Pentru prima lentilă a expandorului, pe care densitatea de putere este cea mai mare s-a ales ca material ZnS. În cazul celorlalte componente s-a optat pentru ZeSe.

S-a impus o valoare medie a lungimii expandorului, $L = 60$ mm, astfel încât să nu rezulte un coeficient de expandare mare și, în consecință, un diametru mare al obiectivului de focalizare. Din punct de vedere optic, deschiderea fasciculului de intrare $D' = 21$ mm este mare. Sistemul optic, față de majoritatea aplicațiilor de tip imaging, care formează imagini micșorate ale obiectelor, prezintă particularitatea că prin expandorul, care este un sistem telescopic inversat, mărește deschiderea fasciculului incident. În acest caz, pot rezulta aperturi ale obiectivului care să conducă la probleme aberaționale greu sau imposibil de rezolvat. Diametrul $D = 36$ mm, corelat cu distanța focală estimată a obiectivului, $f' = 157$ mm, conduc la o valoare rezonabilă a numărului de deschidere $f/\# = 4.4$.

Se observă faptul că toate trei lentilele au rezultat, așa cum era de așteptat, sub forma menisc. Valorile razelor se încadrează în limite care corespund fezabilității fără probleme din punct de vedere tehnologic și sunt suficient de mari pentru ca piesele să fie foarte subțiri, ceea ce este convenabil din punct de vedere al regimului termic în care vor lucra.

Parametrii de calitate estimați prezintă valori, de asemenea, foarte bune. Diametrul minim al causticii este estimat la $59\mu\text{m}$, iar profunzimea focarului la aproximativ 6mm , în condițiile unei variații a spotului de $\pm 6\mu\text{m}$.

Având în vedere observațiile de mai sus se consideră că soluția originală proiectată pentru sistemul optic asociat echipamentului laser de tăiere satisface toate cerințele funcționale, de siguranță și calitate.

Totuși, soluția optomecanică nu poate fi definitivată fără o analiză detaliată a performanțelor optice.

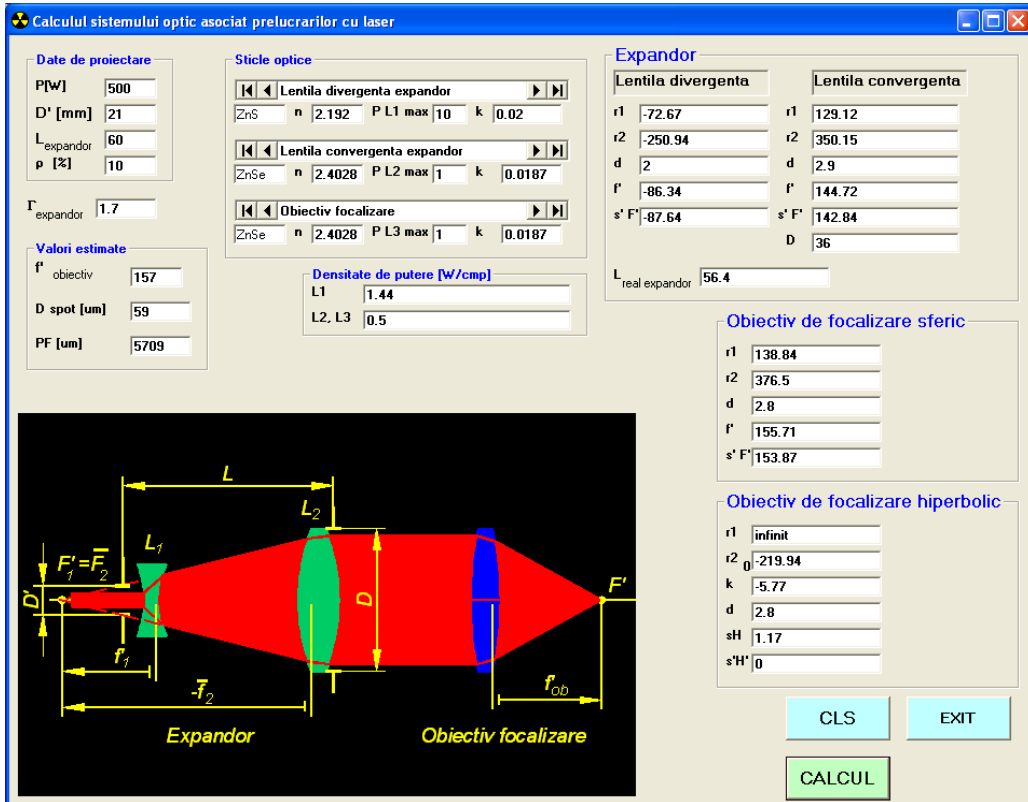


Fig. 5.28 Interfața programului de calcul al sistemului optic asociat prelucrărilor cu laser, conținând datele de proiectare și rezultatele obținute

5.4.3 Analiza calității sistemului optic proiectat

Analiza sistemului optic lenticular obținut s-a realizat cu ajutorul programului OSLO LT. Prima variantă studiată este cea cu obiectiv sferic. În figura 5.29 este redată foaia de date a sistemului, în care s-au introdus valorile razelor, grosimilor, distanțelor dintre lentile, sorturile de materiale și s-a setat lungimea de undă de analiză, 10.6 μm, precum și raza fasciculului de intrare egală cu 21/2 mm.

Figura 5.30 conține o reprezentare la scară a componentelor și a mersului razelor marginale prin sistem.

În subsolul figurii 5.29 este redată fereastra parametrilor globali de calitate a sistemului, rezultați prin analiza statistică a frontului de undă. Se observă că sistemul nu este limitat la difracție, cauza fiind aberația sferică reziduală, așa cum rezultă din figura 5.31. Aceeași figură confirmă absența celorlalte aberații geometrice (coma, astigmatismul, distorsiunea și curbura câmpului).

Surface Data						
Command:						
Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Expandare/focusare laser 10.6um						Efl 94.708811
Ent beam radius	10.500000	Field angle	5.7296e-05	Primary wavln	10.600000	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14		AIR	
AST	-72.670000	2.000000	10.500000	AS	GLASS1	
2	-250.940000	56.400000	10.657146	S	AIR	
3	129.120000	2.900000	17.515877	S	GLASS3	
4	350.150000	10.000000	17.432974	S	AIR	
5	138.840000	2.800000	17.444496	S	GLASS5	
6	376.500000	0.000000	17.240448	S	AIR	
IMS	0.000000	155.506314	9.4709e-05	S		

TW 1 *						
*WAVEFRONT						
WAVELENGTH 1						
PKVAL	OPD	RMS OPD	STREHL RATIO	YSHIFT	XSHIFT	RSZ
2.058135		0.641356	0.084349	--	--	--

Fig. 5.29 Foaia de date a sistemului de expandare/focusare cu obiectiv sferic

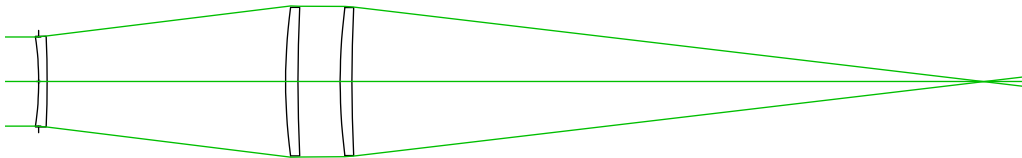


Fig. 5.30 Schema optică a sistemului cu obiectiv sferic

Aberația sferică reziduală are valoare ridicată datorită deschiderii mari a obiectivului și valorii medii a numărului de deschidere. Se observă faptul că din zonă până la margine, practic, valoarea aberației se dublează.

În diagramele spot (fig. 5.31) sunt reprezentate petele de difuzie la diferite defocusări în intervalul ± 2 mm. Indiferent de planul de focusare ales, spotul are dimensiuni mai mari decât cercul Airy (figurat cu negru).

Cel mai mic diametru al spotului se găsește prin defocusarea pe criteriul minimizării parametrului RMS OPD (rădăcina medie pătratică a diferenței optice de drum). Prin defocusarea pe acest criteriu rezultă că spotul de dimensiuni minime se află la abscisa 152.19 mm.

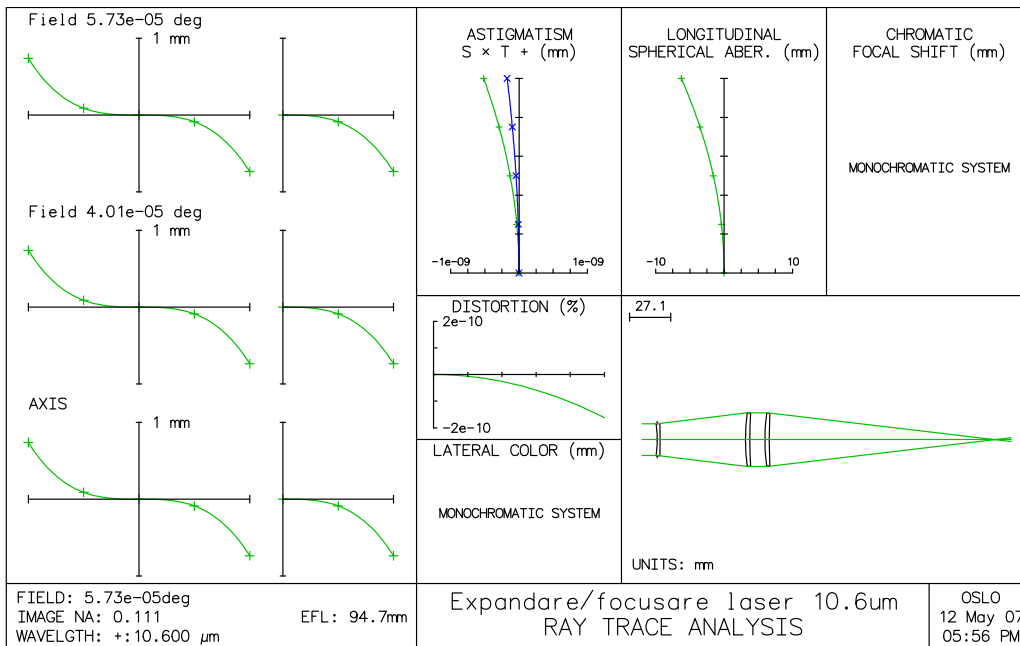
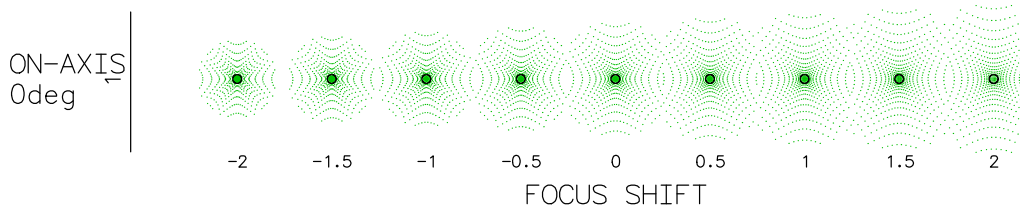


Fig. 5.31 Aberațiile geometrice reziduale ale sistemului cu obiectiv sferic

Fig. 5.32 Diagrama spot pentru defocusări ale sistemului în intervalul ± 2 mm

Pentru această poziție a planului de proiecție este figurată o diagramă spot, din care rezultă că raza spotului este $\sim 150 \mu\text{m}$, în timp ce în cazul sistemului limitat la difracție această rază este de $\sim 56 \mu\text{m}$ (fig. 5.32). Pentru o poziționare corectă a duzei de proiectare a fasciculului se poate obține un spot cu diametrul minim de $\sim 300 \mu\text{m}$.

Dacă se reduce raza fasciculului incident cu numai 2 mm (respectiv înălțimea maximă de incidență devine $h = 8.5 \text{ mm}$), se obține un sistem limitat la difracție.

Parametrii globali de calitate ($P\text{-V OPD} \sim 0.2$, $\text{RMS OPD} < 0.7$, Raportul Strehl > 0.8) indică faptul că sistemul, la această deschidere satisface criteriul Rayleigh. În figura 5.34 este prezentată foaia de date și parametrii de calitate ai sistemului la deschiderea maximă $h = 8.5 \text{ mm}$.

Diagrama spot din figura 5.35 recomandă o mică defocusare negativă. Aceasta corespunde abscisei 153.35, pentru care raza spotului este aproximativ egală cu raza corespunzătoare sistemului limitat la difracție (fig. 5.36).

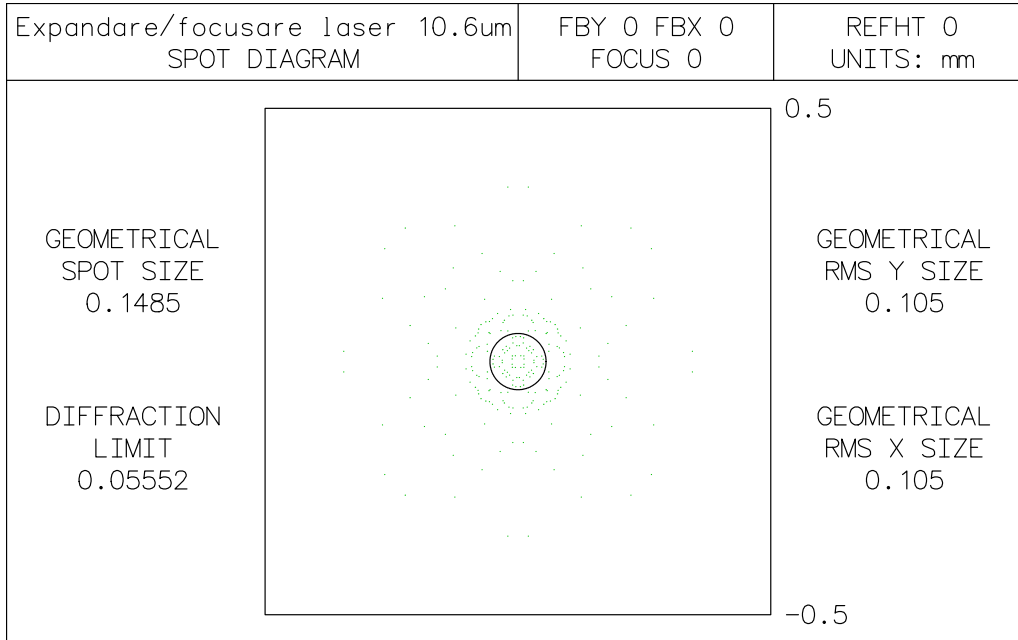


Fig. 5.33 Diagrama spot la abscisa optimă $s'=152.19\text{mm}$ pentru sistemul cu obiectiv sferic

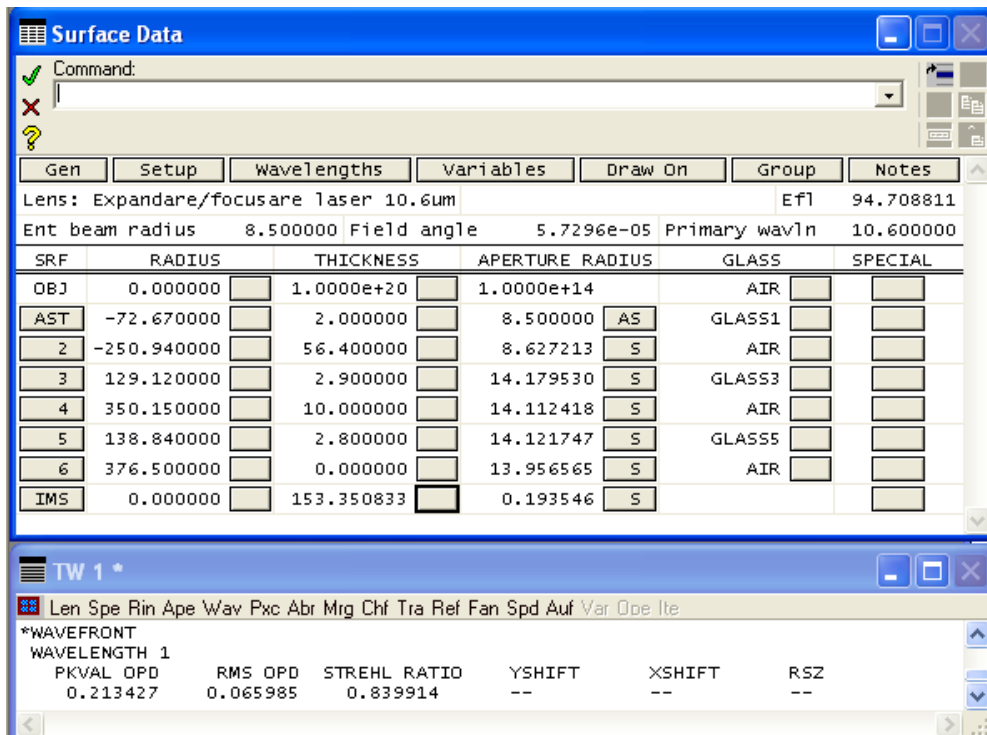


Fig. 5. 34 Foaia de date și parametri de calitate ai sistemului la deschiderea $h = 8.5$

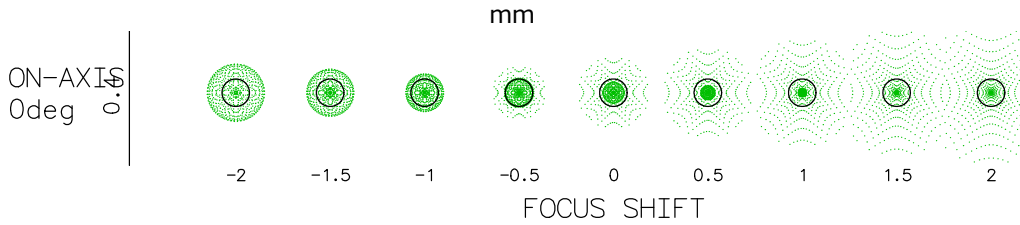


Fig. 5.35 Diagrama spot pentru sistemul cu deschidere maximă $h = 8.5$ mm

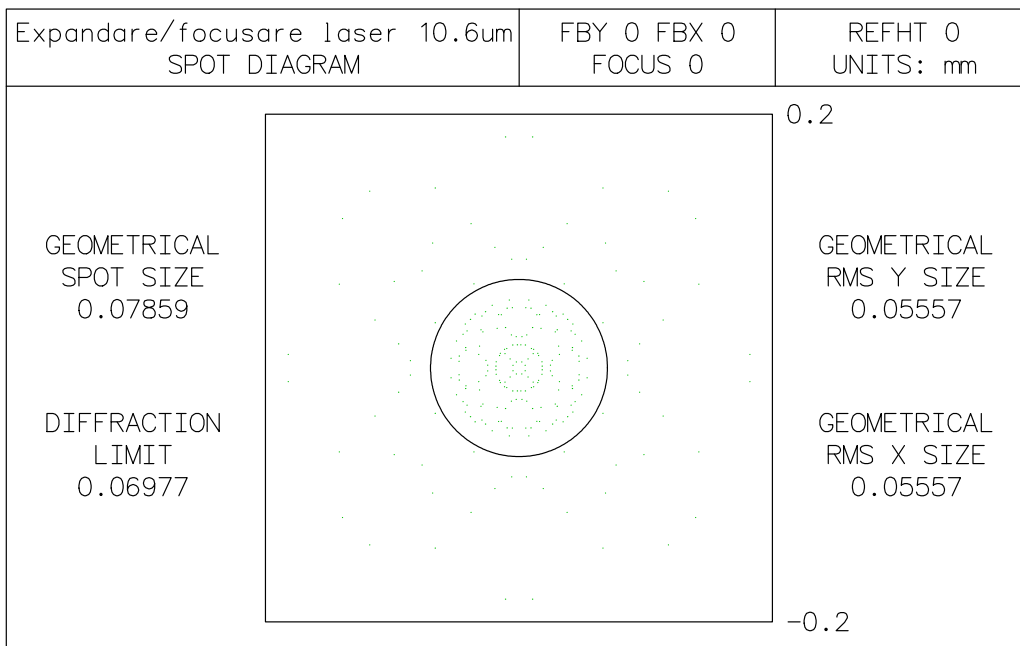
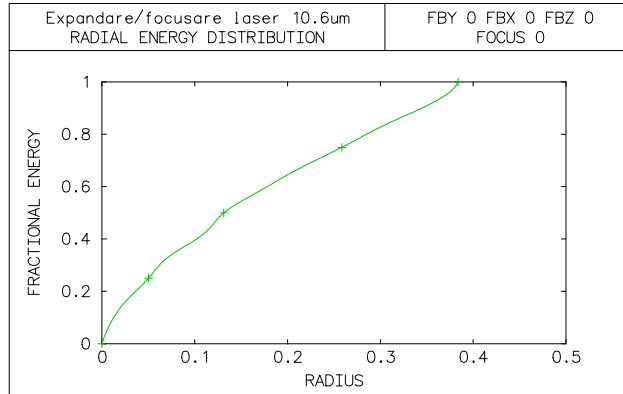
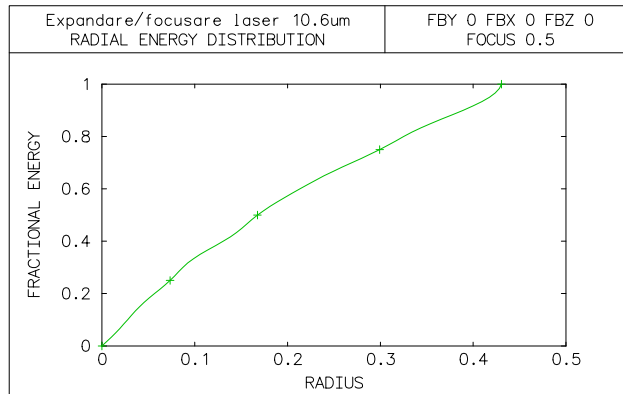
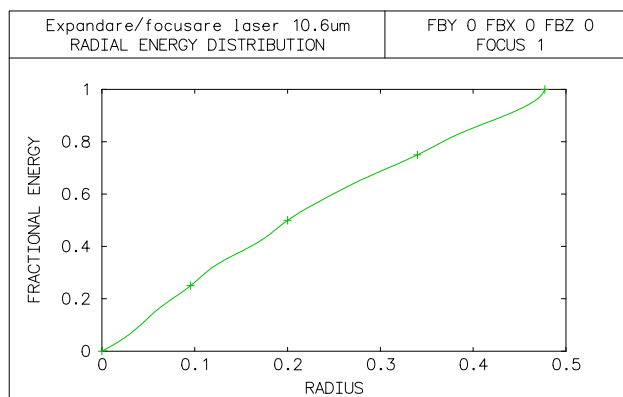


Fig. 5.36 Diagrama spot pentru planul de proiecție pe care pata de difuzie are dimensiuni minime și foarte apropiate de cele ideale

În concluzie, sistemul cu obiectiv de focalizare constituit dintr-o lentilă singulară sferică are o calitate bună, fiind limitat la difracție pe o deschidere apropiată de zona Kerber. Numai radiația incidentă pe ultima cincime a înălțimii de incidență este puternic afectată de aberația sferică reziduală.

Practic, se poate introduce în fața expandorului o diafragmă cu deschiderea de 17mm, cu rol de pupilă de intrare a sistemului. Pierderea de energie datorată micșorării aperturii este justificată de creșterea factorului de concentrare energetică, care poate acționa în sensul îmbunătățirii randamentului și preciziei prelucrării.

Distribuția energetică în pata de difuzie pe intervalul de defocusare [-6...+2] mm este redată în figurile 5.37...5.53. În reprezentarea $E(r)$ distribuția uniformă, ideală corespunde unei drepte. Graficele conțin pe ordonată valori normalizate ale energiei, iar pe abscisă valorile reale în milimetri ale razelor spotului.

Fig. 5.37 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 0$)Fig. 5.38 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 0.5$)Fig. 5.39 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 1$)

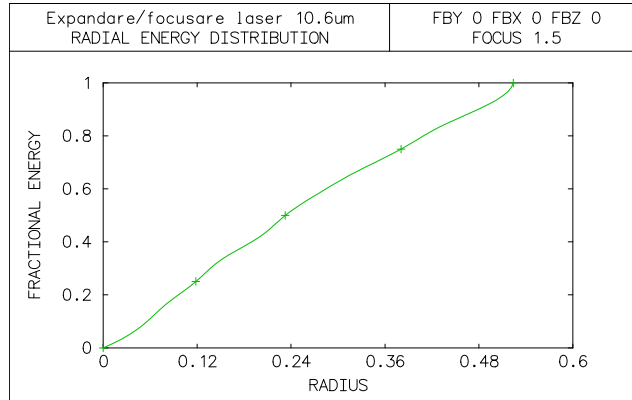


Fig. 5.40 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 1.5$)

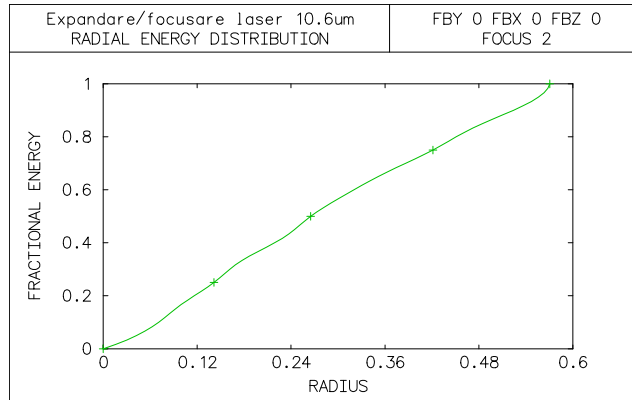


Fig. 5.41 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 2$)

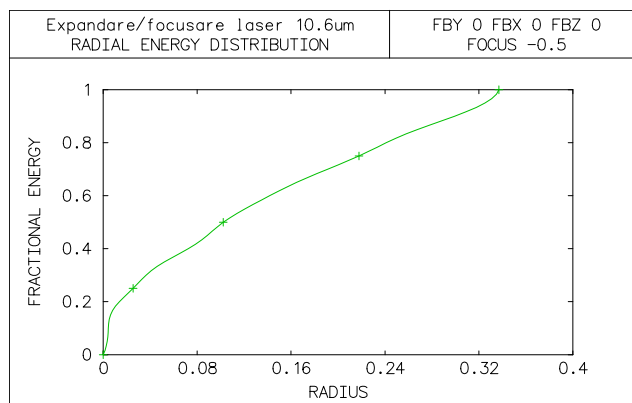
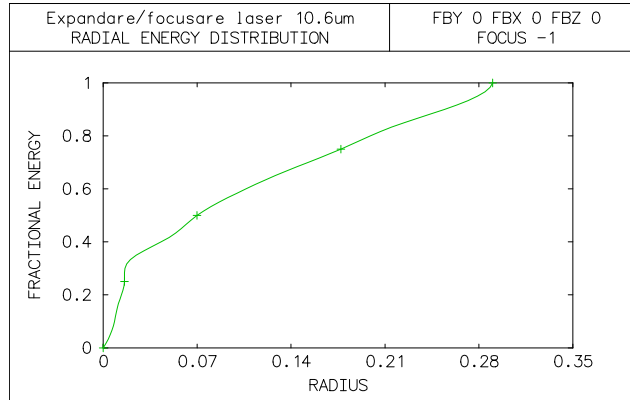
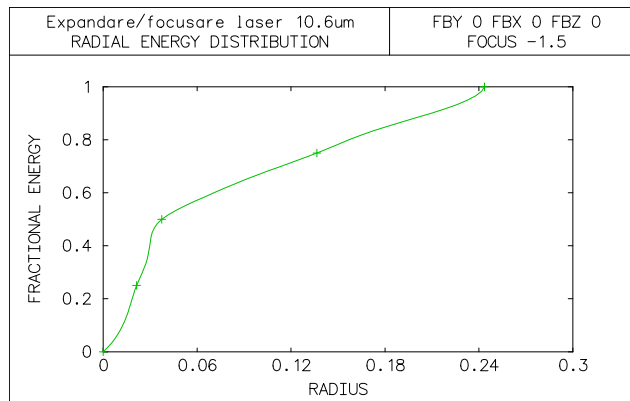
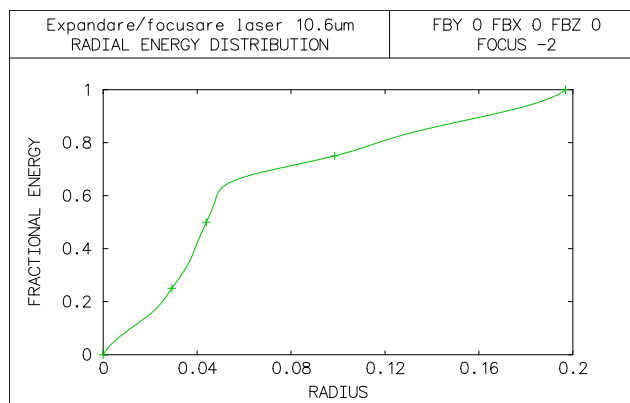


Fig. 5.42 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -0.5$)

Fig. 5.43 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -1$)Fig. 5.44 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -1.5$)Fig. 5.45 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -2$)

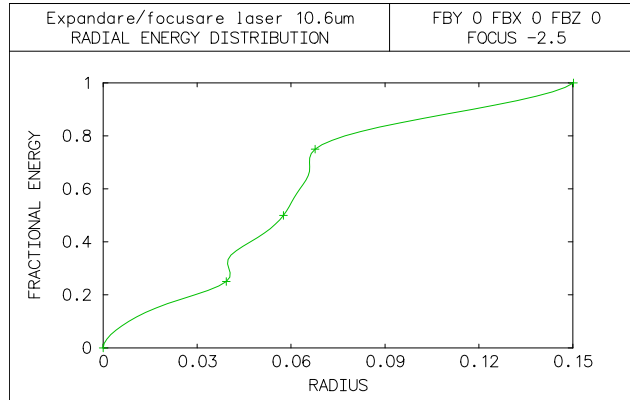


Fig. 5.46 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -2.5$)

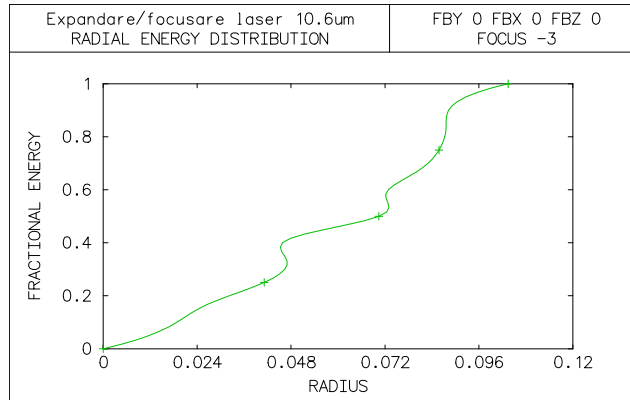


Fig. 5.47 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -3$)

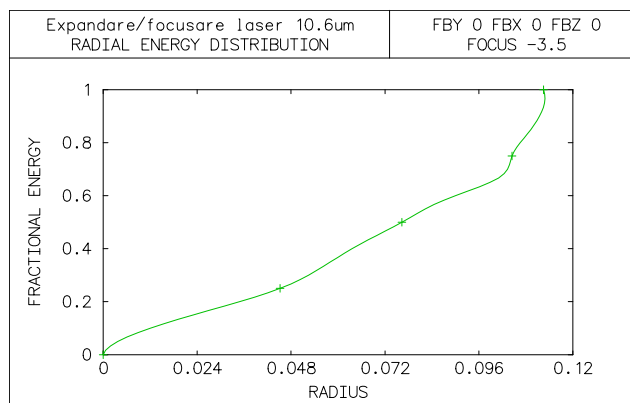
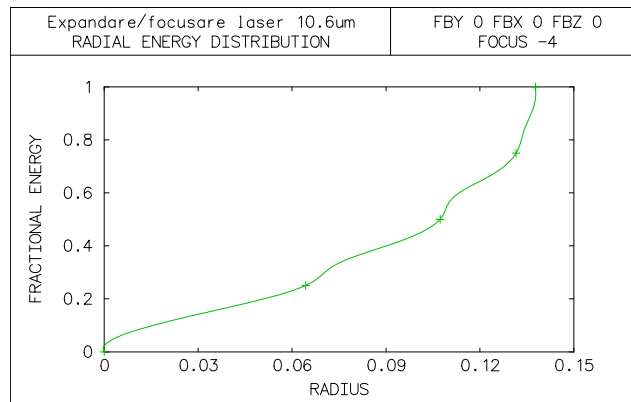
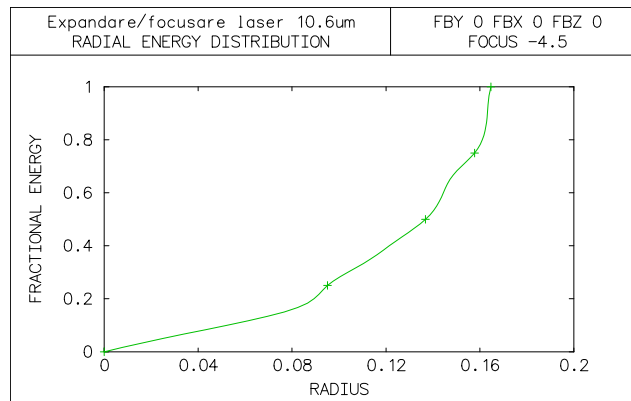
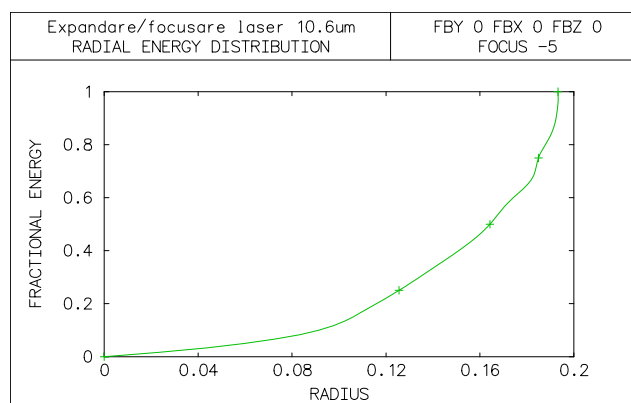
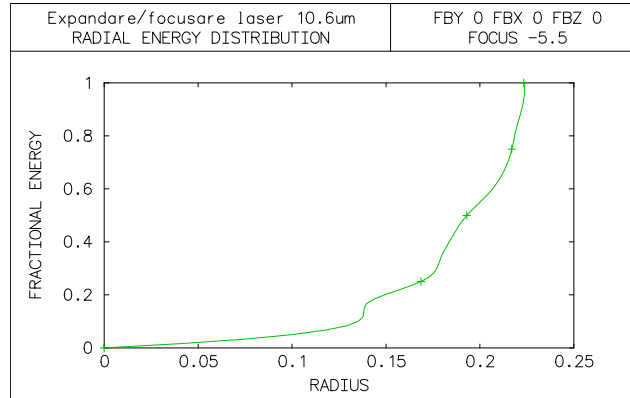
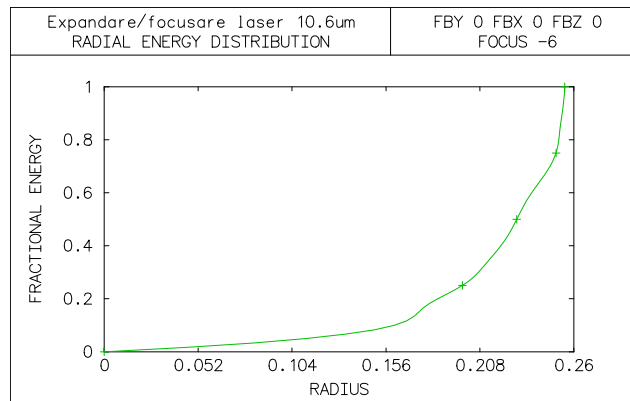


Fig. 5.48 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -3.5$)

Fig. 5.49 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -4$)Fig. 5.50 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -4.5$)Fig. 5.51 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -5$)

Fig. 5.52 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -5.5$)Fig. 5.53 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -6$)

Pe baza datelor din figurile de mai sus s-a trasat forma causticii corespunzătoare intervalului de defocusare $[-6, +2]$. În figura 5.53 este reprezentată o variație a semisecciónii a spotului pe acest interval (suprafața colorată în roșu). Caustica (trasată cu linie neagră) a fost aproximată analitic printr-un polinom de gradul 10 a cărei ecuație este redată pe figură. Linia galbenă marchează raza spotului pentru sistemul ideal limitat la difracție. Se observă coincidența ordonatelor pentru o defocusare de ~ -3 mm. De asemenea, distribuția energiei este relativ uniformă pentru această defocusare. În figura 5.54 este reprezentată variația energiei în raport cu raza spotului și se observă că interpolarea liniară este adecvată. Din punct de vedere fizic semnificația liniarității este deosebită în sensul că aceasta descrie uniformitatea repartiției energetice pe suprafața spotului. Acest parametru influențează calitatea tăierii prin câmpul termic pe care îl determină.

Prelucrarea precisă a unor piese de grosime care depășește 2...3 mm necesită un sistem mecanic suplimentar de menținere a defocusării, odată cu avansul în adâncime al tăieturii.

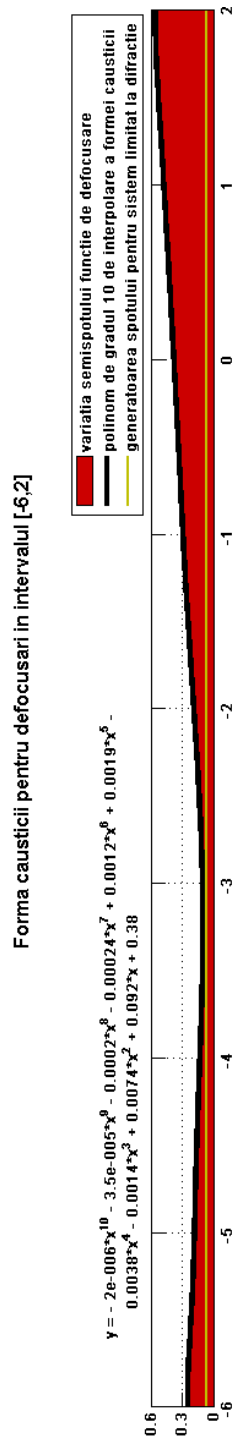


Fig. 5.54

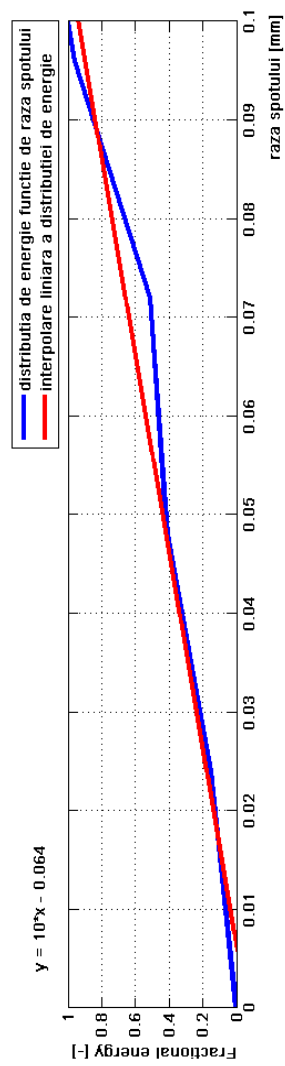


Fig. 5.55

Pentru îmbunătățirea calității sistemului, respectiv pentru extinderea calității de limitat la difracție pe întreaga apertură se propune a doua variantă a obiectivului de focalizare, constând într-o lentilă singulară asferică.

Soluția de sistem optic asociat prelucrărilor laser cu obiectiv asferic a fost introdusă pentru analiză în programul OSLO LT. Foia de date a acestei variante de sistem și parametrii sintetici de calitate sunt redați în figura 5.56. Schema optică și mersul razelor marginale prin sistem pot fi urmărite în figura 5.57.

Față de datele rezultate din calculul de proiectare a sistemului (fig. 5.28) s-a practicat o optimizare prin variația constantei conice, criteriul fiind minimizarea aberației sferice. Lentila asferică având $k = -5.77$, a rezultat în ipoteza lentilei singulare. Aceasta însă se află într-un sistem format din cele două lentile ale expandorului, a căror aberație sferică trebuie compensată și poate fi eliminată prin modificarea formei dioptriului asferic. Valoarea finală a constantei conice este $k = -18.16$.

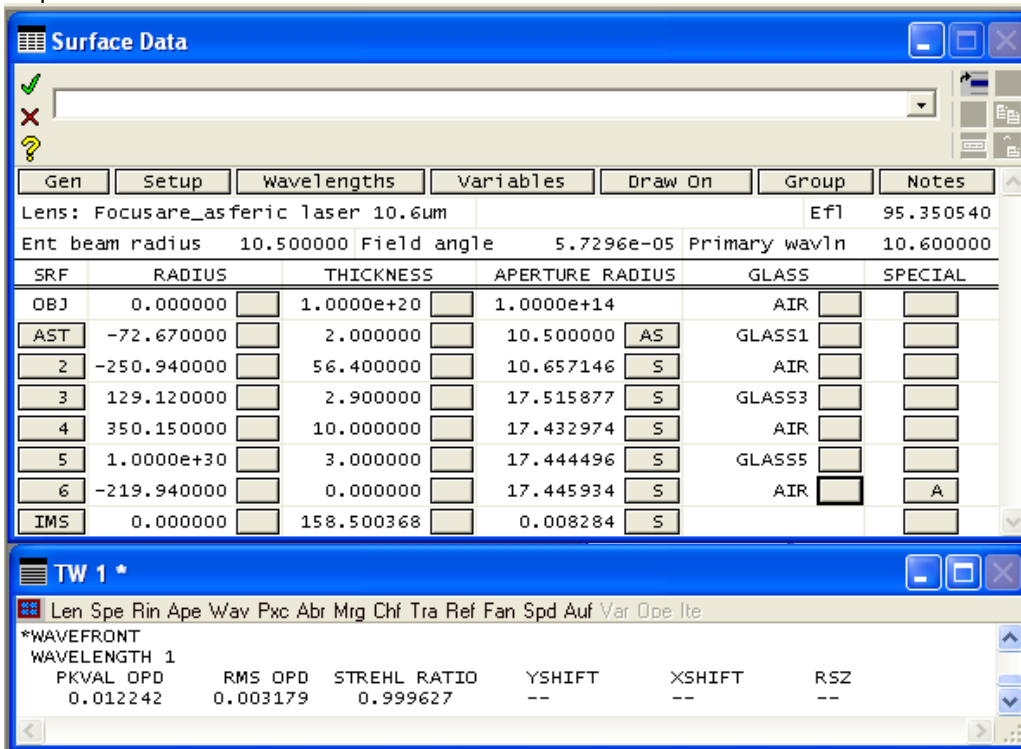


Fig. 5.56 Foia de date și parametrii sintetici de calitate ai sistemului cu obiectiv asferic

Valorile P-V OPD = 0.012, RMS OPD = 0.003 și raportul Strehl = 0.99 situează sistemul total aproape de ideal.

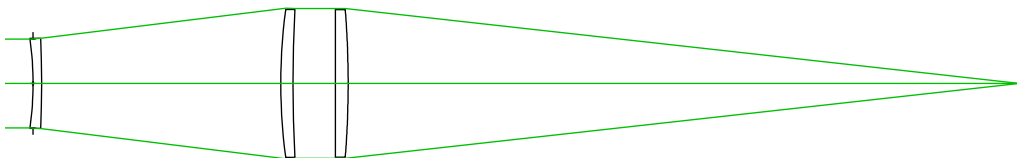


Fig. 5.57 Schema optică a sistemului cu obiectiv asferic

În figura 5.58 este prezentat rezultatul analizei aberaționale. Se observă faptul că aberațiile geometrice sunt, practic, neglijabile. Față de soluția anterioară alura curbei care reprezintă variația aberației sferice este diferită, în sensul care favorizează creșterea calității sistemului. Aberația sferică reziduală este maximă aproximativ la nivelul zonei și are o valoare în jur de 0.1 mm.

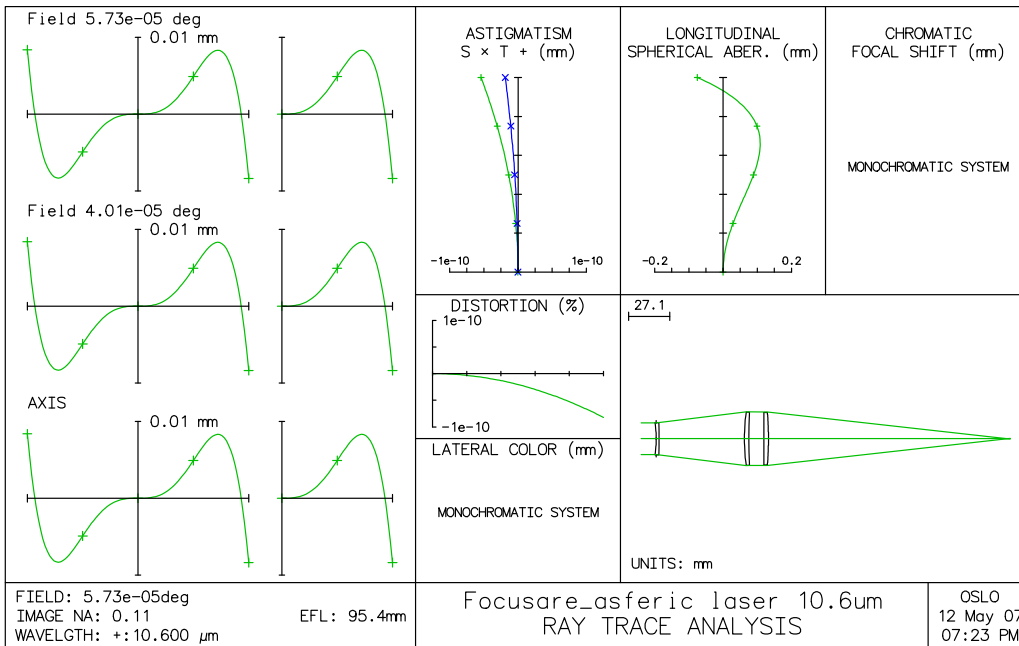


Fig. 5.58 Aberațiile geometrice reziduale ale sistemului cu obiectiv asferic

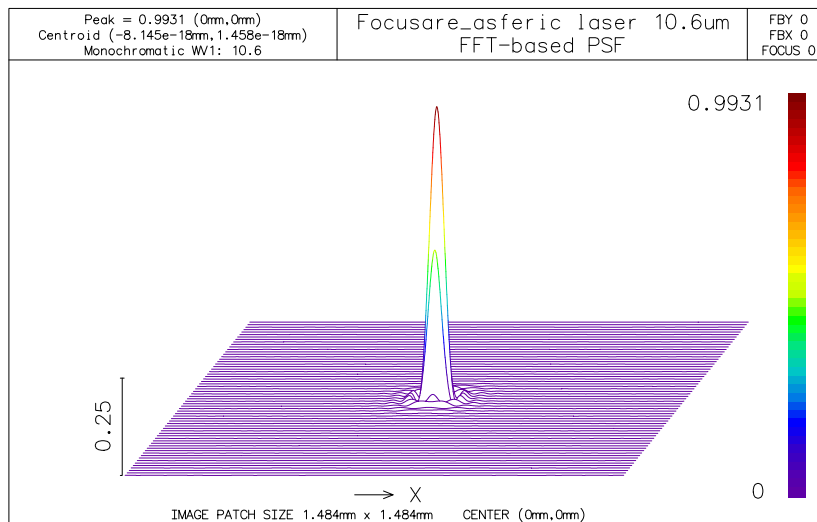


Fig. 5.59 PSF pentru sistemul cu obiectiv asferic

Alura PSF și valoarea sa foarte apropiată de unitate confirmă caracterul limitat la difracție al sistemului (fig. 5.59).

Mărimea petei de difracție și profunzimea focarului pot fi evaluate prin analiza diagramei spot. Figura 5.60 prezintă o imagine de ansamblu a modului în care se modifică mărimea petei de difuzie la defocusări de $\pm 2\text{mm}$.



Fig. 5.60 Diagrama spot pentru sistemul cu obiectiv asferic la defocusări în intervalul $\pm 2\text{mm}$

Figura 5.61 prezintă diagrama spot corespunzătoare focarului paraxial. Se observă raza petei de difuzie reale este mai mică decât raza cercului Airy ($0.058\mu\text{m}$).

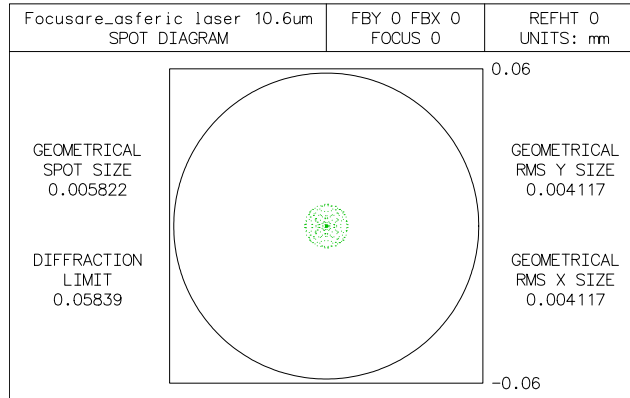


Fig. 5.61 Diagrama spot corespunzătoare focarului paraxial

În figurile 5.62 – 5.74 este prezentată variația distribuției de energie pe raza spotului pentru defocusări în intervalul $\pm 3\text{mm}$, cu pasul de 0.5 mm .

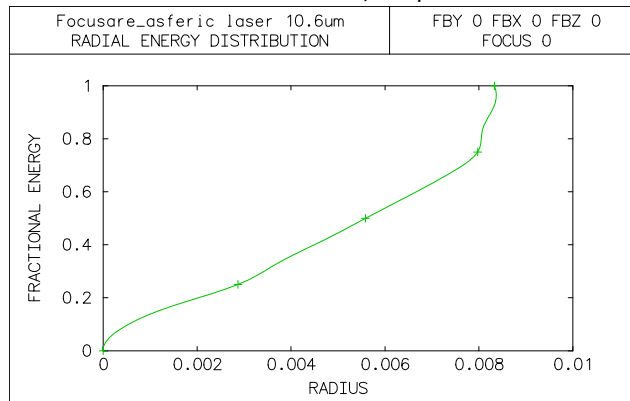
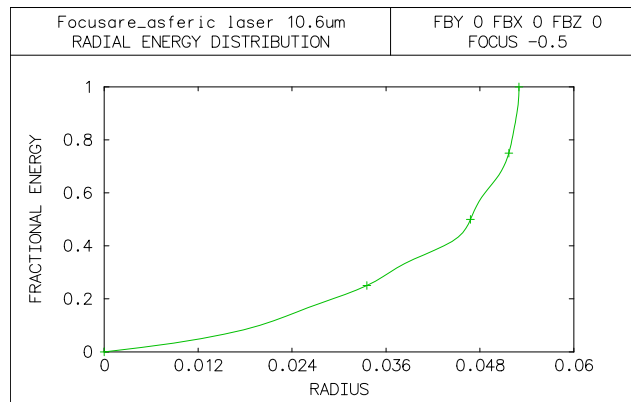
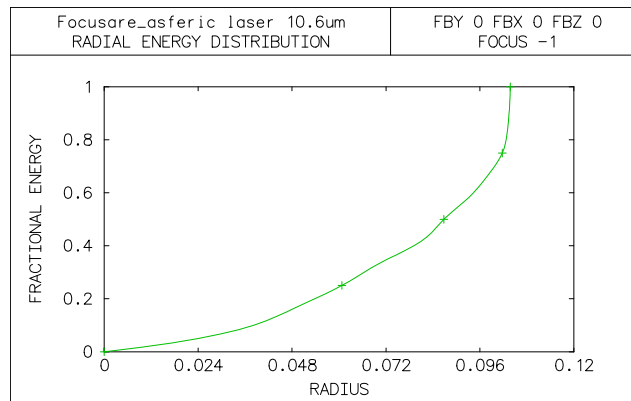
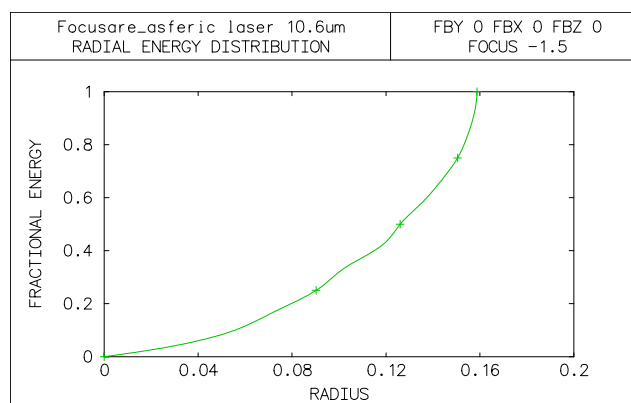
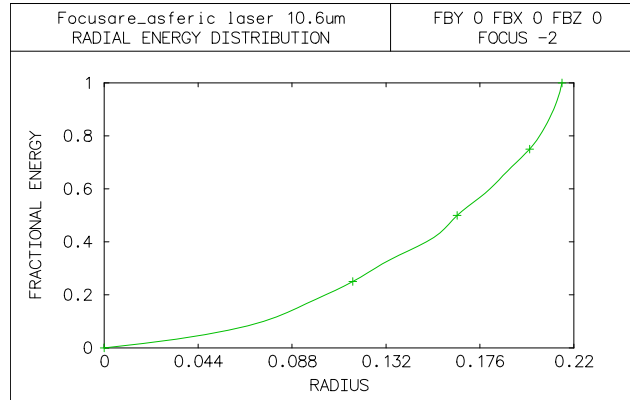
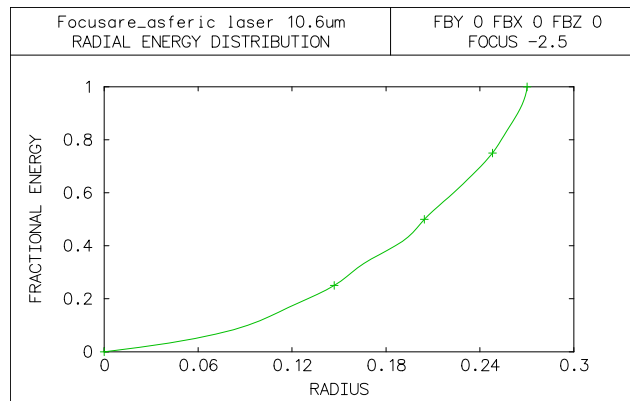
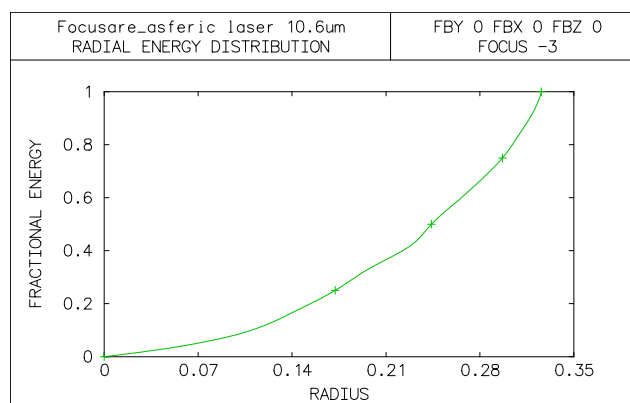
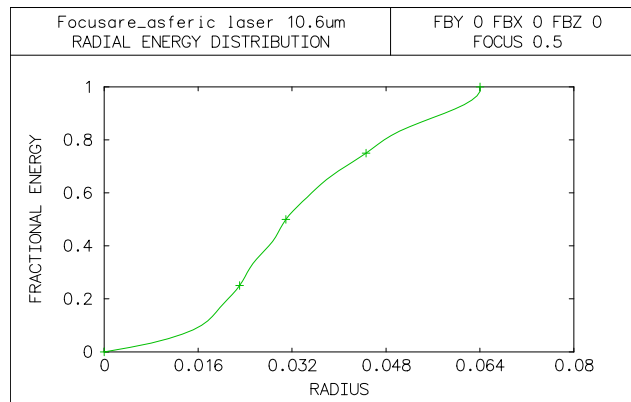
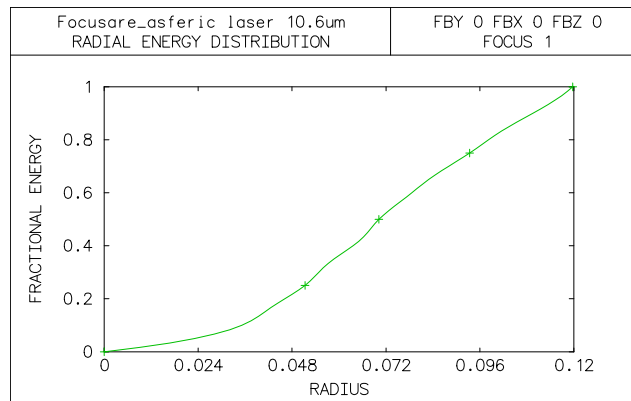
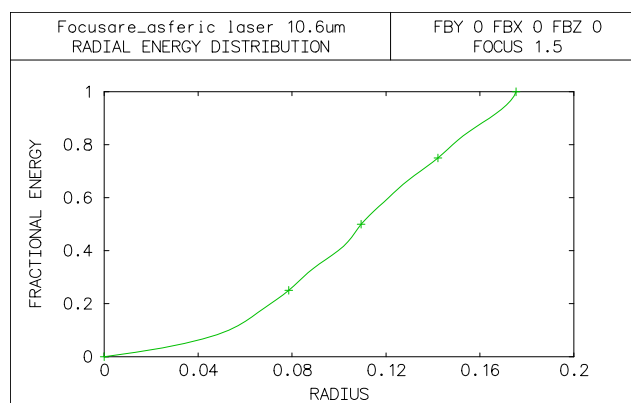
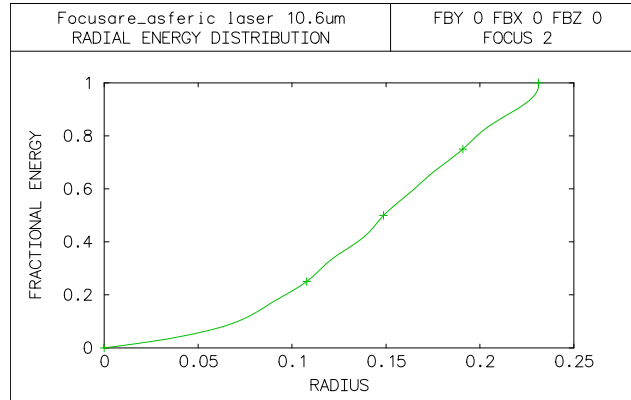
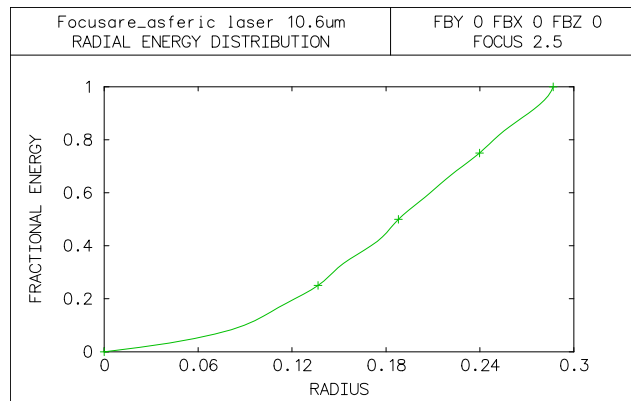
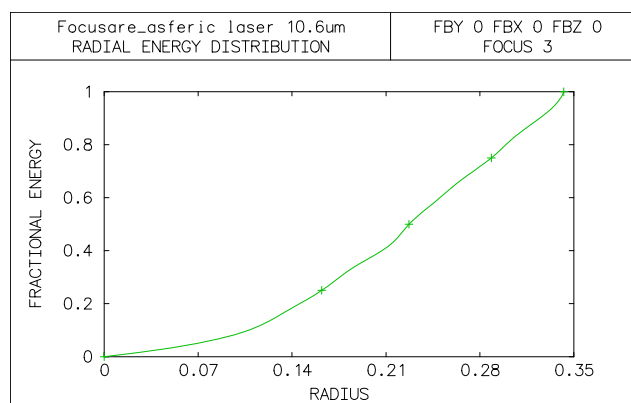


Fig. 5.62 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 0$)

Fig. 5.63 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -0.5$)Fig. 5.64 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -1$)Fig. 5.65 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -1.5$)

Fig. 5.66 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -2$)Fig. 5.67 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -2.5$)Fig. 5.68 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = -3$)

Fig. 5.69 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 0.5$)Fig. 5.70 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 1$)Fig. 5.71 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 1.5$)

Fig. 5.72 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 2$)Fig. 5.73 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 2.5$)Fig. 5.74 Distribuția energetică funcție de raza spotului ($\Delta f' = 3$)

Pe baza datelor din figurile de mai sus s-a trasat forma causticii corespunzătoare intervalului de defocusare $[-3, +3]$. În figura 5.75 este reprezentată o variație a semisecciónii spotului pe acest interval (suprafața colorată în roșu). Caustica (trasată cu linie neagră) a fost aproximată analitic printr-un polinom de gradul 10 a cărei ecuație este redată pe figură. Linia galbenă marchează raza spotului pentru sistemul ideal limitat la difracție. Se observă că la abscisa focarului paraxial raza spotului este inferioară celei corespunzătoare criteriului Rayleigh. De asemenea, distribuția energiei este relativ uniformă pentru această defocusare. În figura 5.76 este reprezentată variația energiei în raport cu raza spotului și se observă că interpolarea liniară este adecvată. Raza spotului real se menține la valori mai reduse decât raza cercului Airy pentru defocusări în intervalul ± 0.5 mm. Rezultă că prin deplasarea controlată a capului de tăiere se pot obține piese cu precizie foarte ridicată la grosimi de cel puțin 5 mm.

Comparând cele două soluții de sisteme optice expandor – obiectiv se pot face următoarele observații:

- sistemul cu obiectiv sferic nu este limitat la difracție pe întreaga apertură; calitatea sistemului poate fi îmbunătățită prin micșorarea deschiderii fasciculului incident până la un nivel corespunzător zonei Kerber a aperturii inițiale
- raza spotului este aproximativ egală cu raza cercului Airy (0.07 mm) pentru o defocusare de ~ 3 mm
- raza causticii pe un interval de 8 mm variază asimetric de la abscisa $\Delta f' = -3$ mm, până la ~ 0.25 mm (la $\Delta f' = -6$ mm), respectiv ~ 0.6 mm ($\Delta f' = 6$ mm) – fig. 5.54
- la diverse defocusări densitatea de energie nu este uniform distribuită pe suprafața petei de difuzie. Cea mai uniformă distribuție coincide cu raza minimă a spotului. Într-o reprezentare $E(r)$ variația liniară caracterizează această uniformitate (fig. 5.47 și 5.55)
- pentru abscise ale planului de focalizare (diferite de $\Delta f' = -3$ mm) curbele $E(r)$ au o alură fie concavă fie convexă, de curburi mai mult sau mai puțin accentuate, funcție de defocusare, indicând concentrarea energiei fie în zona marginală, fie în cea centrală a spotului. Din acest punct de vedere sunt preferabile defocusările pe abscisă corespunzătoare planului $\Delta f' = -3$ mm. În zona acestora deși spotul are rază mare, energia radiației este concentrată în centrul petei. La defocusări sub -3mm, deși spotul are rază mai scăzută relativ la defocusările pozitive, densitatea de energie este mare într-o zonă marginală tot mai restrânsă. Din punct de vedere tehnologic soluția este defavorabilă
- uniformitatea distribuției de energie este esențială pentru calitatea tăierii prin influența asupra distribuției câmpului termic în zona de prelucrare. Se urmărește obținerea unei arii cât mai restrânse de topire a materialului piesei și o zonă afectată termic de extindere cât mai redusă în volumul piesei
- mărimea spotului depinde de apertura expandorului și de focala obiectivului. În figura 5.5 este prezentată o nomogramă orientativă pentru această dependență, rezultată prin cercetările uneia dintre cele mai prestigioase firme de profil, Laser Power Optics. Sistemul original proiectat în paragrafele anterioare are focala de $\sim 6''$ și în comparație cu caracteristicile din figura 5.5 prezintă calitate mai bună.

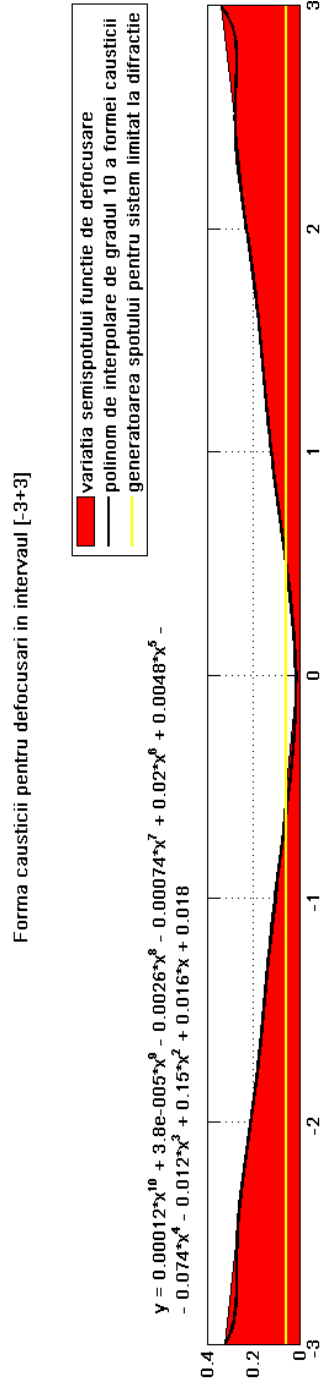


Fig. 5.75

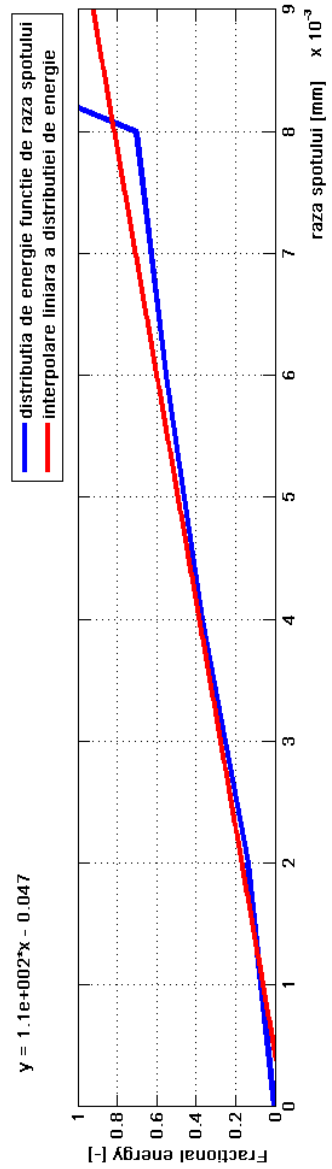


Fig. 5.76

- sistemul optic expandor – obiectiv asferic este limitat la difracție pe întreaga apertură și, în general, toți parametrii de calitate ai sistemului sunt superiori celui cu obiectiv sferic
- raza minimă a spotului corespunde planului focal paraxial și este aproximativ de 10 ori mai mică decât raza cercului Airy (0,0058 mm și respectiv 0,058 mm)
- sistemul optic cu obiectiv asferic este superior celui oferit de piață
- dimensiunile spotului se mențin inferioare cercului Airy pentru defocusări în intervalul ± 0.5 mm
- caustica are o alură relativ simetrică la stânga și la dreapta focarului paraxial. La defocusări de ± 3 mm, raza spotului este ~ 0.33 mm. La o corelare corespunzătoare a vitezei de avans al capului de tăiere cu regimul termic din zona de prelucrare se pot obține precizii foarte ridicate ale tăierii
- în ceea ce privește distribuția energiei în pata de difuziune se constată că uniformitatea acesteia, ca și în cazul anterior, corespunde abscisei pentru care spotul are dimensiuni minime. Figura 5.76 ilustrează caracterul practic liniar al dependenței $E(r)$. Defocusările negative sau pozitive corespund concentrării energiei fie în centrul spotului, fie în zona de margine a acestuia (fig. 5.63 – fig. 5.74). Mai favorabile sunt desigur situațiile în care energia este mai densă în centrul petei, fenomen caracteristic defocusărilor pozitive. Acest aspect trebuie avut în vedere la proiectarea legii de avans a capului de tăiere.

5.5 Concluzii. Contribuții personale

În prezentul capitol al tezei s-au tratat probleme legate de proiectarea sistemelor optice asociate echipamentelor de tăiere cu fascicul laser, cu referire directă la laserii cu CO₂ care emit radiația de 10.6 μm .

În primul paragraf este descrisă schema optică de principiu necesară transportului și focalizării unui fascicul laser destinat prelucrărilor mecanice de tăiere.

Sunt prezentate caracteristicile specifice expandorului și obiectivului de focalizare laser, cu evidențierea unor parametri de calitate care aparțin domeniului opticii non-imaging.

Al doilea paragraf este dedicat deducerii unor algoritmi de calcul ai telescopului inversat cu rol de expandor și ai obiectivului de focalizare în două variante: menisc cu suprafețe sferice și lentilă plan-convexă asferică. Este adaptat algoritmul clasic de calcul de gabarit al lunetei Galilei, se stabilesc relații pentru dimensionarea optică a obiectivului de focalizare utilizând dependențe între parametrii specifici de interes pentru aplicație: diametrul spotului, focala obiectivului, numărul de deschidere, adâncimea focarului, lungimea de undă, apertura fasciculului incident. Pentru sinteza tuturor lentilelor sferice se propune utilizarea algoritmului de proiectare a lentilelor de cea mai bună formă privind aberația sferică. Ca variantă a obiectivului sferic se propune o soluție de lentilă asferică, plan-hiperbolică.

Pentru sinteza tuturor componentelor sistemului optic sunt necesare materiale cu caracteristici adecvate domeniului spectral de lucru, care în cazul pus în discuție este strict monocromatic, la lungimea de undă de 10.6 μm . Sunt prezentate detaliat și comentate critic caracteristicile optice, mecanice și termice ale celor mai performante materiale adecvate lungimii de undă de lucru. Sunt prezentate ZnSe, ZnS, AsGa, Ge, cuarțul pentru IR etc.

Pentru aplicarea algoritmilor de proiectare propuși s-a elaborat un soft original dedicat calculului de gabarit al expandorului și obiectivului, respectiv sintezei lentilelor, cu cele două variante ale obiectivului. Paragraful 4 al capitolului descrie detaliat interfața grafică și codul aferent programului. Acesta este rulat pentru datele de intrare corespunzătoare aplicației practice, care urmează să facă obiectul capitolului de determinări experimentale.

S-a utilizat un număr minim de date de intrare (puterea laserului, diametrul fasciculului incident și lungimea aproximativă a sistemului) pentru a putea introduce în calcul cât mai multe corelații matematice între parametrii geometrici, optici și de material. În ceea ce privește materialele s-a optat pentru ZnSe în construcția lentilei divergente a expandorului și obiectivul de focalizare și pentru ZnS la fabricarea lentilei convergente a expandorului.

Au rezultat două soluții de sisteme optice, care au fost analizate cu programul OSLO LT.

Varianta cu obiectiv sferic are o calitate bună, dar este limitată la difracție numai pe aproximativ 85% din apertura sistemului. Analiza este desfășurată în ipoteza acceptării acestei deschideri de lucru. Sunt determinați parametrii globali de calitate ai sistemului și parametrii specifici non-imaging ai aplicației laser. Sunt analizate mărimea diametrului spotului funcție de defocusare, ceea ce permite evaluarea formei causticii datorate aberației sferice reziduale a sistemului. Este urmărită, de asemenea, ca parametru important, uniformitatea distribuției energiei pe suprafața petei de difuziune, la diverse defocusări.

Se constată asimetria causticii în raport cu planul focal paraxial. Spotul minim corespunde unei defocusări negative de -3 mm. Diametrul spotului la această abscisă este aproximativ egală cu raza cercului Airy.

Varianta cu obiectiv asferic este superioară celei cu obiectiv sferic la toți parametrii de calitate globali și specifici. De remarcat este faptul că spotul minim corespunde focarului paraxial și are dimensiuni cu un ordin de mărime mai mic decât cercul Airy. Rezultă o profunzime a focarului mai bună decât în cazul anterior și, ca urmare, posibilitatea prelucrării mai precise a pieselor.

Ambele variante confirmă valorile estimate prin algoritmi de calcul propuși, ceea ce recomandă validarea acestora.

În comparație cu oferta pieței mondiale, soluțiile originale proiectate au calități superioare.

Printre contribuțiile personale cuprinse în prezentul capitol se pot cita următoarele:

- identificarea particularităților sistemelor optice asociate echipamentelor de prelucrare cu fascicul laser
- stabilirea unor corelații între parametrii geometrici și optici – imaging și non-imaging, astfel încât numărul datelor de intrare în proiectarea sistemului optic să fie minim și să nu conducă la incompatibilități, care să necesite intervenții repetate, iterative și fără criterii precizate, din partea operatorului
- elaborarea unui algoritm original de proiectare a sistemului optic expandor – obiectiv de focalizare, pe baza adaptării algoritmului de calcul de gabarit al lunetei Galilei inversate și a introducerii corelațiilor de parametri amintite mai sus
- elaborarea unui soft ca aplicație Microsoft Visual Basic, până la varianta executabilă, utilizabilă pentru proiectarea și sinteza componentelor sistemelor optice asociate laserilor de tăiere cu lungimea de undă de $10.6 \mu\text{m}$
- rularea programului cu date de intrare corespunzătoare determinărilor experimentale ulterioare

- obținerea unor soluții de sisteme optice performante, limitate la difracție, superioare celor din oferta actuală a pieței de profil
- analiza detaliată a sistemelor cu obiectiv sferic, respectiv asferic, cu evaluarea și discutarea unor parametri esențiali, printre care: diametrul minim al spotului, forma causticii, planul de focusare optim, distribuția energiei pe suprafața spotului laser, efectele defocusării și limitele acesteia în raport cu menținerea unei precizii de prelucrare date
- recomandări privind principiile de proiectare a legii de deplasare a capului de tăiere, astfel încât creșterea secțiunii causticii să afecteze cât mai puțin abaterea de la liniaritate a generatoarei conturului piesei prelucrate.

[B2] [B6] [C11] [G1] [G2] [G3] [G4] [G5] [G6] [G7] [H2] [K1] [M2] [N1] [N3] [N4]
[N5] [O1] [S3] [S6] [S7] [S8] [W2] [***]

6. PROGRAM EXPERIMENTAL DE OPTIMIZARE A PROCESULUI DE PRELUCRARE CU FASCICUL LASER

6.1 Scopul și etapele de desfășurare a programului

Programul experimental urmărește, într-o formulare foarte sintetică, creșterea eficienței și preciziei prelucrării pieselor mecanice prin tăiere pe contur cu fascicul laser dirijat.

Practic, s-a apelat la un echipament de tăiere care utilizează o sursă laser cu CO₂, cu ajutorul căruia s-a realizat un lot de roți dințate din material plastic.

Parametrul de calitate – țintă care s-a urmărit a fost starea suprafețelor rezultate prin tăiere, pentru care s-a considerat că cel mai sintetic indicator de rugozitate este abaterea medie a profilului R_a.

Numărul pieselor (experimentelor), factorii care influențează parametrul - țintă și interacțiunile dintre factorii de influență în proces au fost stabiliți conform unui plan de experiențe Taguchi fracționat. Conform teoriei elaborate de metoda de proiectare robustă Taguchi, s-au stabilit combinațiile selective de factori de influență. Au rezultat 8 astfel de combinații, au fost implementate pe echipament și s-a procedat la prelucrarea efectivă a roților dințate, executate în seturi de câte 5 bucăți aferente fiecărei combinații.

Măsurarea pieselor a permis derularea programului de optimizare Taguchi a procesului de prelucrare, respectiv identificarea combinației optime de parametri de influență în scopul obținerii valorii țintă a criteriului R_a.

Datele obținute din măsurări au fost introduse în softul specializat Qualitek, care derulează automat întreg formalismul Taguchi și oferă rezultate ușor accesibile, numerice și grafice, secvențiale și finale.

Pentru validarea rezultatelor obținute din program, cu titlul de set optim de parametri de proces, s-a proiectat și realizat și un experiment ilustrativ, de confirmare.

În schema logică de mai jos (fig. 6.1) sunt prezentate etapele de desfășurare a programului cu conexiunile logice și cronologice aferente.

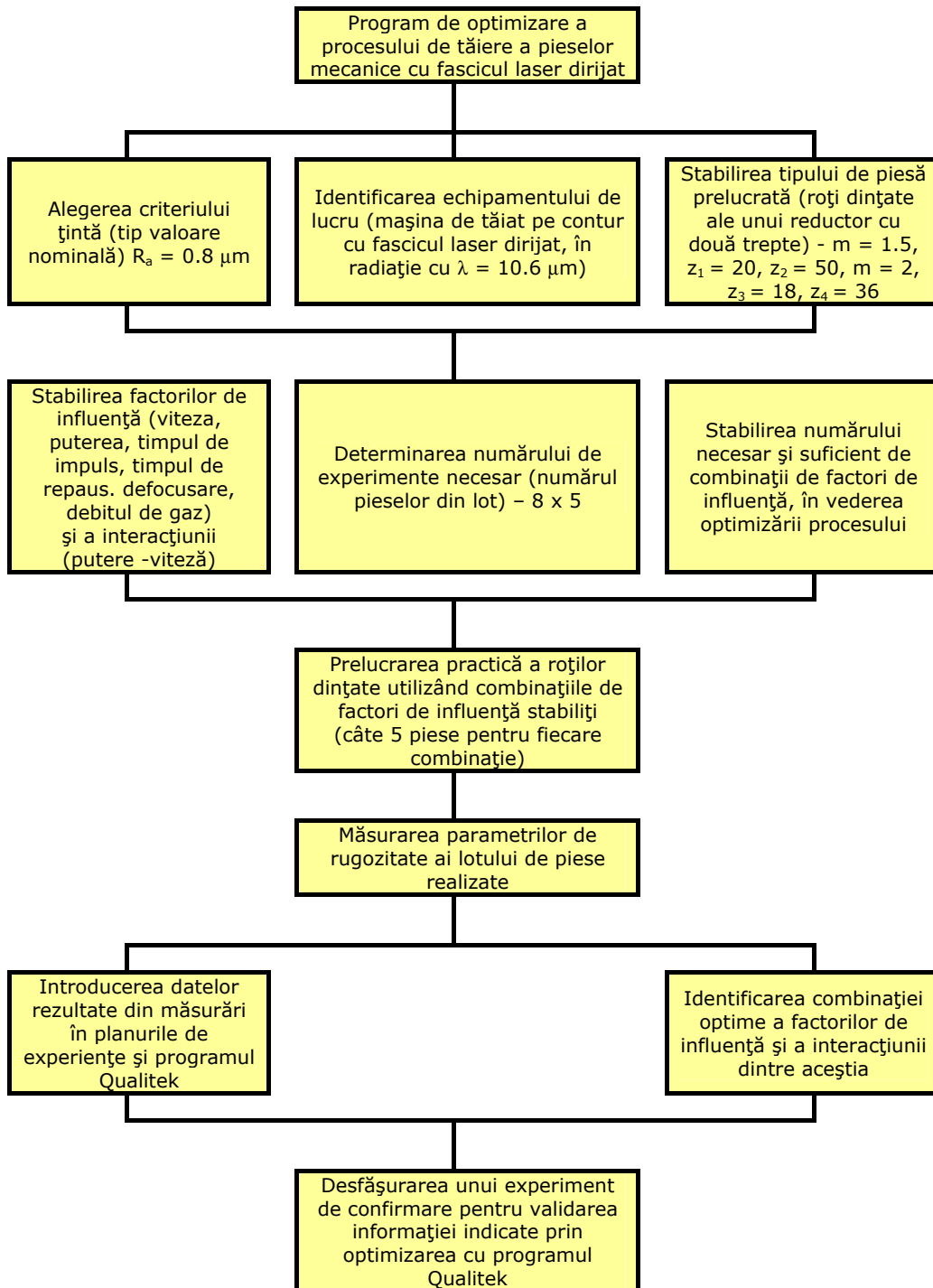


Fig. 6.1 Schema logică a derulării programului experimental

6.2 Instalația experimentală

Pentru realizarea experimentelor (tăierea roților), a fost folosită o instalație de tăiere laser cu CO₂ de 2 KW, asistată de calculator, existentă în dotarea laboratorului C.A.L.F.A. din cadrul I.U.T. Bethune, Universite d'Artois, Franța.

O imagine și schema instalației laser utilizate sunt prezentate în figura 6.2.

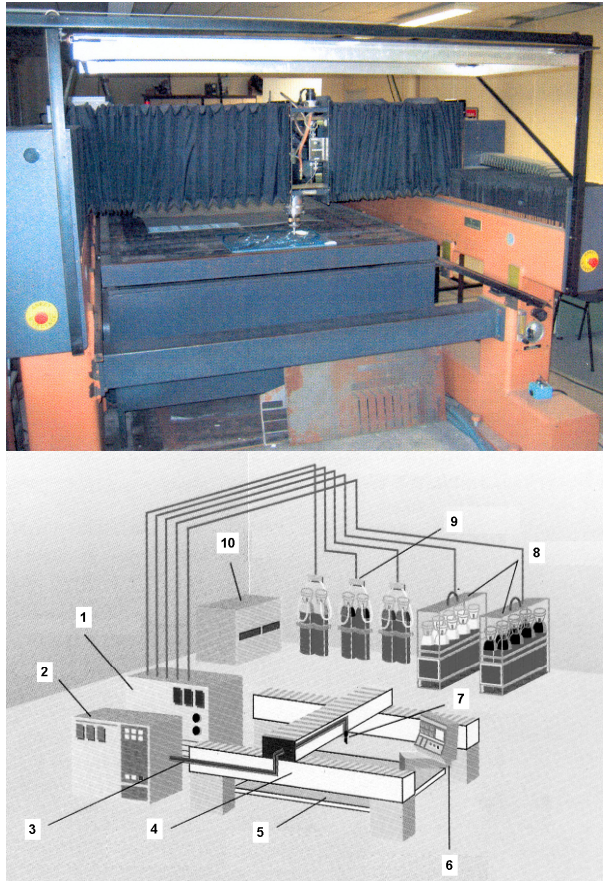


Fig. 6.2 Instalația laser cu CO₂

În schema din figura 6.2 sunt atribuite numere de ordine subansamblurilor constructiv – funcționale principale, după cum urmează:

1. – modul de alimentare electrică la parametri adecvați echipamentului
2. – sursa laser cu CO₂
3. – traseu optic al fasciculului de lucru
4. – structura mecanică a mașinii de tăiere
5. – semifabricat de prelucrat
6. – modul de comandă numerică
7. – cap de tăiere dirijat
8. – subansambluri de asigurare a gazului de asistență (He, Ar, N₂, O₂)
9. – subansamblu de alimentare cu gaz pentru mediul activ (CO₂)
10. – grup de răcire

Parametrii care caracterizează și influențează procesul de prelucrare ai oricărei instalații laser sunt:

- a. lungimea de undă [μm], care depinde de natura mediului emițător, impune anumite caracteristici sistemului optic și determină parametrii concreți de interacțiune cu materialul
- b. divergența fasciculului [deg], care limitează inferior focalizarea fasciculului și este fixată de configurația rezonatorului laser
- c. puterea emisă [W], a cărei mărime trebuie reglată în funcție de natura și grosimea materialului. Puterea depinde practic liniar de curent (fig. 6.3).

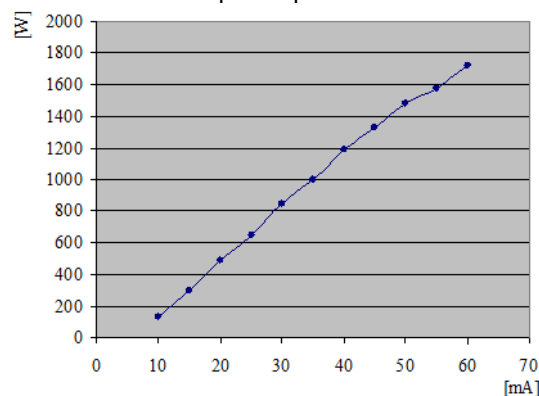


Fig. 6.3 Graficul puterii în funcție de curent

- d. viteza de tăiere (deplasarea relativă fascicul - piesă) [mm/s], care se reglează în funcție de natura și grosimea materialului, puterea laserului, condițiile de focalizare, geometria piesei, natura și caracteristicile gazului
- e. poziția verticală a spotului de focalizare, care se stabilește în funcție de materialul prelucrat și de grosimea piesei
- f. timpii de impuls și de repaus [ms], care influențează dinamica proceselor termice
- g. curgerea gazului, care trebuie reglată în sensul creșterii performanțelor de tăiere prin două acțiuni:
 - chimică – gazul utilizat reacționează cu materialul prelucrat
 - mecanică – prin viteza sa, debitul este canalizat și injectat în axa fasciculului
- h. natura, presiunea și debitul gazului (gazul poate avea efect chimic; presiunea este reglată în funcție de natura gazului utilizat și de obiectivul urmărit - viteză sau calitate; debitul se determină în funcție de presiune și diametrul duzei)
- i. distanța duză/piesă [mm], care trebuie să fie constantă pentru a conserva curgerea gazului
- j. duza (geometria internă și diametrul de ieșire), care are un rol important pentru injecția gazului.

6.3 Proiectarea CAD a roților dințate și generarea codului NC

Echipamentul laser utilizat în experimente are înglobat programul Laser DX3 care este conceput ca o extensie AutoCAD, completând facilitățile acestuia în domeniul proiectării constructive asistate de calculator și asigurând un puternic

modul de programare a mașinilor unelte cu comandă numerică. Permite conducerea procesului de fabricație a reperului de la schița de bază până la piesa finită.

Principalele etape care trebuie urmate în vederea utilizării echipamentului laser sunt prezentate schematic în figura 6.4.

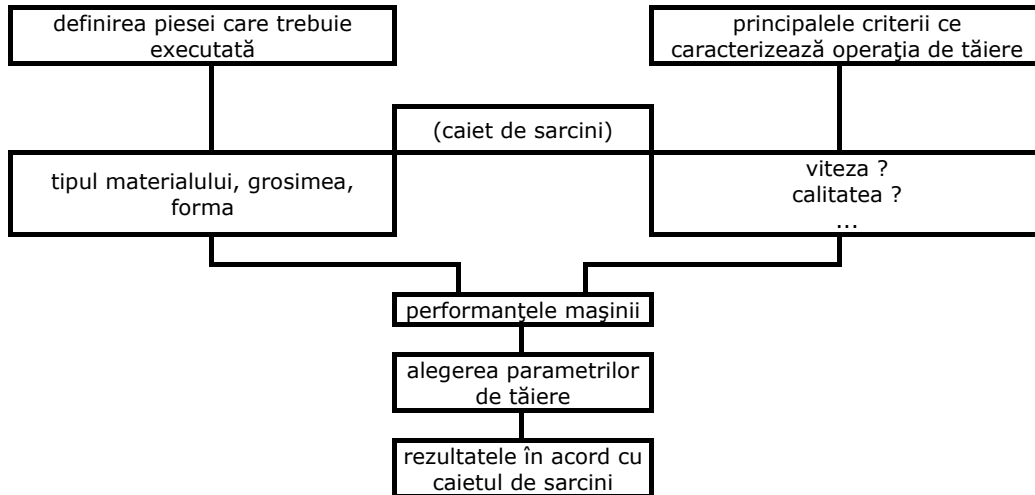


Fig. 6.4 Etapele de realizare a unui produs pe echipamentul de tăiere cu laser

Echipamentul și, respectiv programul Laser DX3 necesită ca date de intrare fișiere CAD, care au fost elaborate în programul AutoCAD, cu extensia dxf, pe baza datelor obținute din calculele de dimensionare și de geometrie a 4 roți dințate cilindrice cu dinți drepecți (corespunzătoare angrenajelor unui reductor în două trepte cu raportul de transmitere total $i = 4$) – fig. 6.5.

Roțile sunt executate dintr-un material plastic (policarbonat) și sunt caracterizate prin elementele geometrice prezentate în figura 6.6.

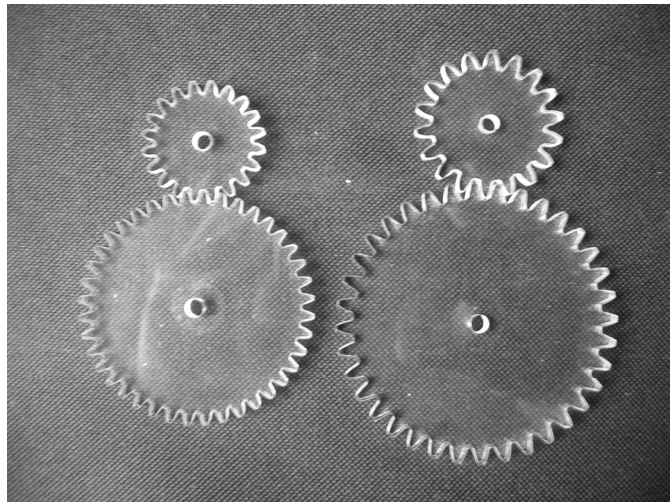
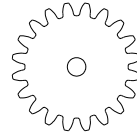
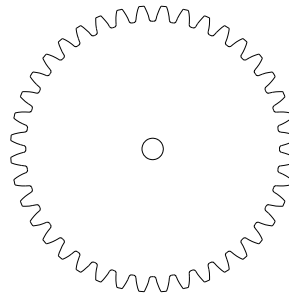


Fig. 6.5 Cele patru tipuri de roți dințate executate pe instalația de tăiat cu laser

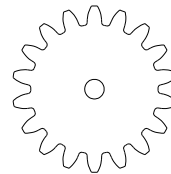
- numărul de dinți: $z = 20$
- modulul: $mn = 1,5$
- diametrul de divizare: $d = 30$ mm
- diametrul de rostogolire: $d_w = 30$ mm
- diametrul de fund: $d_f = 26,25$ mm
- diametrul de bază: $d_b = 28,19077$ mm
- diametrul de cap: $d_a = 33$ mm
- înălțimea dintelui: $h = 3,375$ mm



- numărul de dinți: $z = 40$
- modulul: $mn = 1,5$
- diametrul de divizare: $d = 60$ mm
- diametrul de rostogolire: $d_w = 60$ mm
- diametrul de fund: $d_f = 56,25$ mm
- diametrul de bază: $d_b = 56,38155$ mm
- diametrul de cap: $d_a = 63$ mm
- înălțimea dintelui: $h = 3,375$ mm



- numărul de dinți: $z = 18$
- modulul: $mn = 2$
- diametrul de divizare: $d = 36$ mm
- diametrul de rostogolire: $d_w = 36$ mm
- diametrul de fund: $d_f = 31$ mm
- diametrul de bază: $d_b = 33,82983$ mm
- diametrul de cap: $d_a = 40$ mm
- înălțimea dintelui: $h = 4,5$ mm



- numărul de dinți: $z = 36$
- modulul: $mn = 2$
- diametrul de divizare: $d = 72$ mm
- diametrul de rostogolire: $d_w = 72$ mm
- diametrul de fund: $d_f = 67$ mm
- diametrul de bază: $d_b = 67,65787$ mm
- diametrul de cap: $d_a = 76$ mm
- înălțimea dintelui: $h = 4,5$ mm

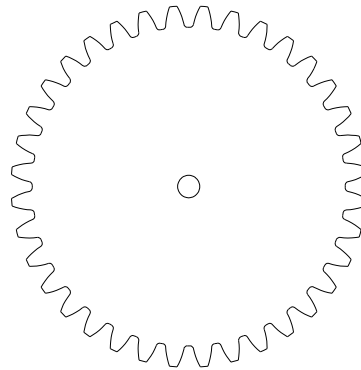


Fig. 6.6 Elemente de geometrie a roților dințate proiectate

Modulul de proiectare constructivă a reperului, din programul Laser DX3, completează o serie de funcții de bază AutoCAD pentru a le adapta specificului domeniului. Facilitează obținerea unui fișier de tip *.dwg, care reprezintă desenul piesei 2D (fig. 6.7).

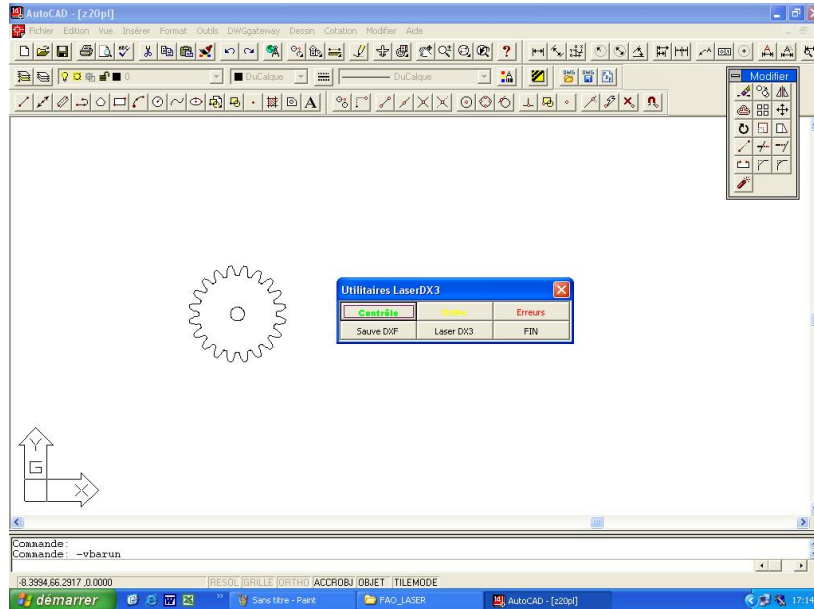


Fig. 6.7 Modulul de proiectare constructivă

Proiectarea tehnologiei de fabricație pe mașina uneltă cu comandă numerică cuprinde partea de procesare și postprocesare necesare pentru obținerea fișierului *.txt, reprezentând programul de prelucrare CNC a piesei pe echipamentul laser (fig. 6.8).

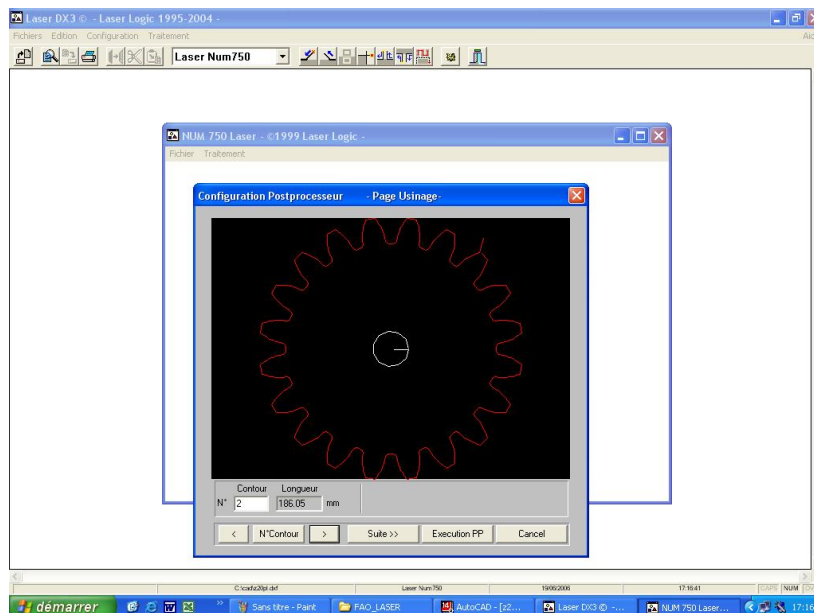


Fig. 6.8 Modulul de proiectarea a tehnologiei de fabricație

Fișierul de comandă numerică, cu adaptare la formatul de gestiune a fișierelor, specific calculatorului echipamentului CNC de pe mașina unealtă asigură transferul programului de prelucrare CNC, obținut anterior cu Laser DX3, pe calculatorul instalației laser (fig. 6.9).

Datele de intrare sunt fișiere CAD (*.dxf), care sunt importate, pentru a fi generat desenul de execuție cu figurarea traseului de prelucrare, a punctelor de intrare/ieșire și a curselor în gol precum și programul NC.

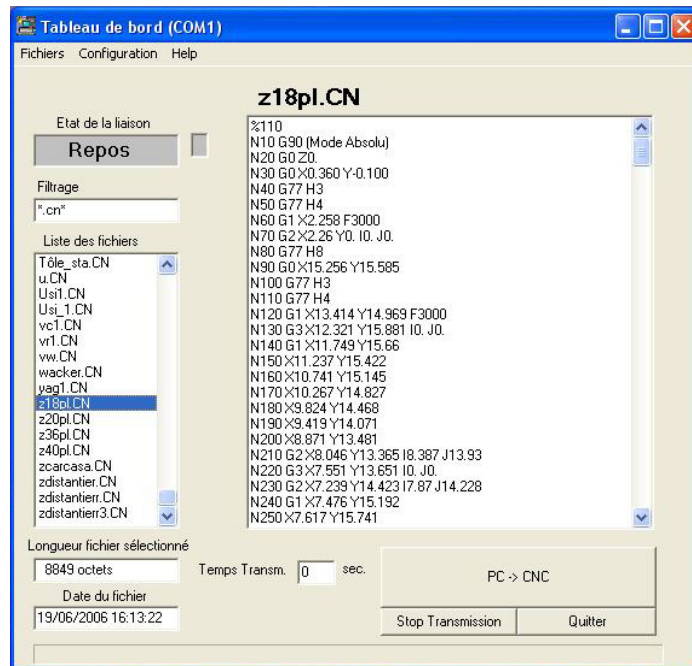


Fig. 6.9 Transferul fișierului de comandă numerică

Programul alocă automat direcțiile optime de tăiere, intrări și ieșiri ale sculei, ordinea secvențelor de prelucrare, procedeele de prelucrare și alte opțiuni de prelucrare NC.

Laser DX3 permite procesarea automată a unei serii de fișiere CAM, efectuând conversia acestora în cod NC. Aceste fișiere pot fi importate ca atare (mai multe fișiere conținând fiecare câte o piesă anume) sau poate importa un fișier în care sunt mai multe componente rezultate în urma comenzii *Explode data* pentru un ansamblu.

Modul de verificare, editare și sortare a codurilor NC generate permite afișarea sub formă grafică a piesei de prelucrat precum și a traseelor de tăiere, a punctelor de intrare - ieșire, curse în gol etc. Laser DX3 oferă posibilitatea modificării manuale a programului NC dacă se consideră necesar, permite selectarea parametrilor de tăiere, cât și listarea la imprimantă a codului NC în format *.txt (fig. 6.10).

Pe baza programului de prelucrare CNC pe mașina unealtă cu comandă numerică, s-a trecut la prelucrarea efectivă a pieselor.

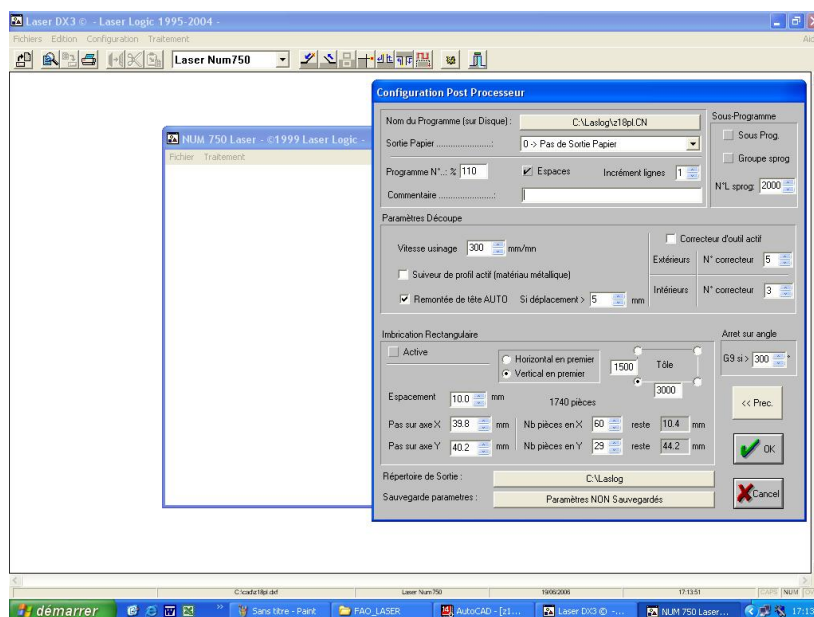


Fig. 6.10 Modul de verificare, editare și sortare a codurilor NC

6.4 Optimizarea parametrilor de proces

În mod curent, când se constată o dispersie sau o instabilitate a caracteristicilor unui produs la fabricarea sau utilizarea sa se caută cauzele pentru a le reduce, sau chiar elimina. Strategia Taguchi este diametral opusă. Aceasta, în loc să caute să elimine acești factori paraziți (numiți factori zgomot), caută să minimizeze impactul lor.

Implementarea ingineriei robuste Taguchi păstrează principiul **PDCA** (**Plan-Do - Check - Act**); (Planifică - Efectuează - Verifică - Acționează) al lui Deming care urmărește următoarele etape:

1. definirea scopului proiectului
2. definirea limitelor subsistemului
3. definirea semnalului de intrare M , a răspunsului de ieșire y și a funcției ideale
4. dezvoltarea strategiilor semnalului și zgomotului
5. definirea factorilor controlați și a nivelurilor acestora
6. formularea experimentului și pregătirea pentru acesta
7. desfășurarea experimentului, colectarea datelor
8. analizarea datelor
9. efectuarea unui experiment de confirmare
10. documentarea și implementarea rezultatelor
11. planificarea următoarelor acțiuni.

6.4.1 Abordarea metodei de proiectare robustă Taguchi

În cazul în care la fabricarea unui produs sau în explorarea acestuia se constată o instabilitate a caracteristicilor sale sau o dispersie mare, conform strategiei clasice a lui Deming, se caută cauzele pentru a reduce variabilitatea (fig.

6.11) sau chiar, dacă este posibil, eliminarea acestora. Prețul înlăturării cauzelor sau cel al reducerii variabilității poate deveni prohibitiv.

Strategia abordării Taguchi se bazează pe minimizarea impactului factorilor paraziți (factori - zgomot), acționând experimental asupra factorilor controlați prin găsirea combinațiilor de valori ale acestora, astfel încât procesul sau produsul să respecte performanțele funcționale și totodată, să fie robust la factorii - zgomot (fig. 6.12).

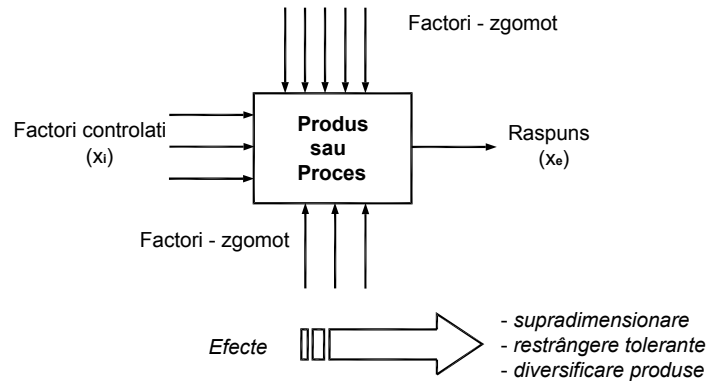


Fig. 6.11 Strategia clasică de minimizare a cauzelor variațiilor

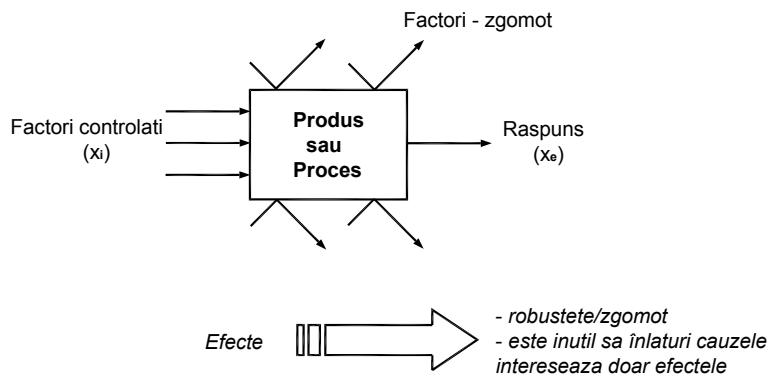


Fig. 6.12 Strategia Taguchi de minimizare a impactului factorilor - zgomot

Strategia adoptată de Genichi Taguchi constă în identificarea combinațiilor de parametri care reduc efectele cauzelor, fără ca acestea să fie afectate direct.

Parametri referitori la produs sau la procesul său de fabricație (tăierea cu fascicul laser a roților dințate), asupra cărora putem acționa ușor, se numesc *factori controlați*

Pentru aplicația privind procesul de tăiere cu fascicul laser, acești parametri sunt:

- A - viteza
- B - puterea
- C - timpul de impuls
- D - timpul de repaus
- E - defocusarea
- F - debitul de gaz

Căutarea valorilor bune care să fie atribuite factorilor controlați se efectuează în mod experimental, cu scopul de a optimiza produsul sau procesul, astfel încât acesta:

- să respecte performanțele funcționale dorite ($R_a \approx 0,8 \mu\text{m}$)
- să fie robust, adică insensibil la factorii zgomot

În raport cu abordarea secvențială - clasică - a metodelor de proiectare (fig. 6.13 și fig. 6.14), Genichi Taguchi introduce o linie nouă, modernă, robustă de proiectare (fig. 6.15 și fig. 6.16).

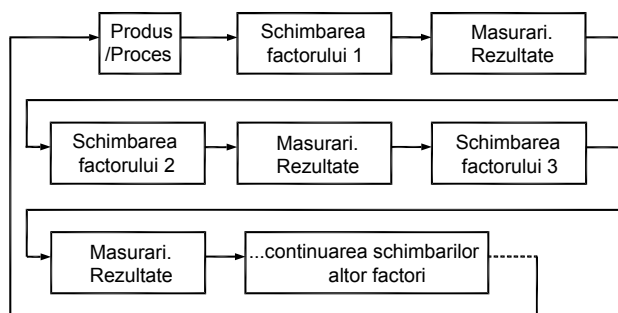


Fig. 6.13 Abordarea clasică

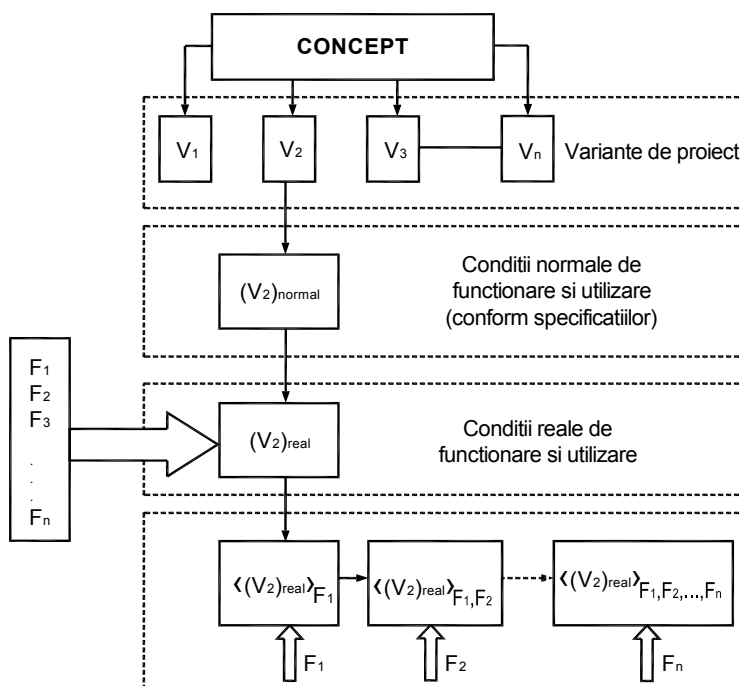


Fig. 6.14 Metoda clasică de proiectare

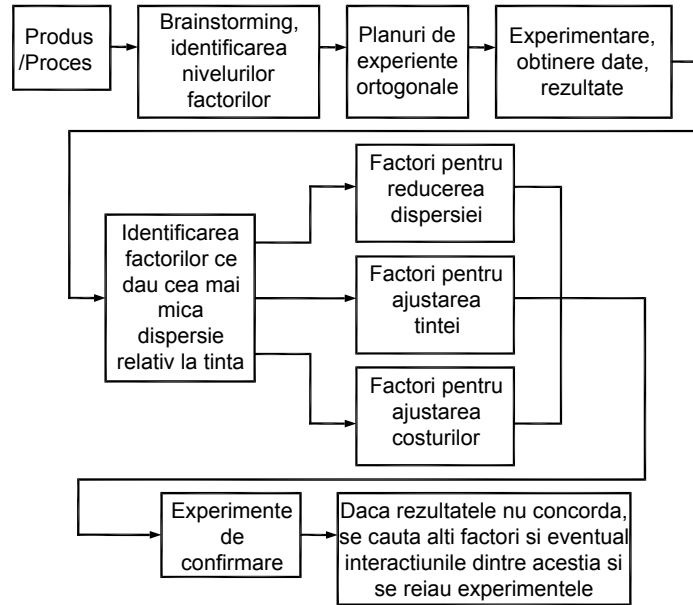


Fig. 6.15 Abordarea Taguchi

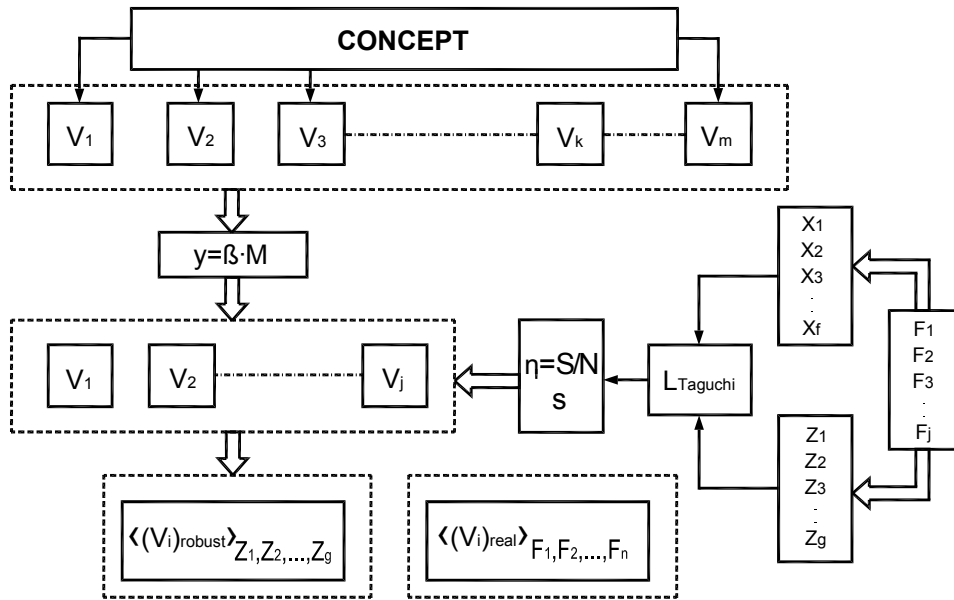


Fig. 6.16 Metoda de proiectare Taguchi

Tabloul sintetic utilizat în Proiectarea Robustă Taguchi este prezentat în figura 6.17.

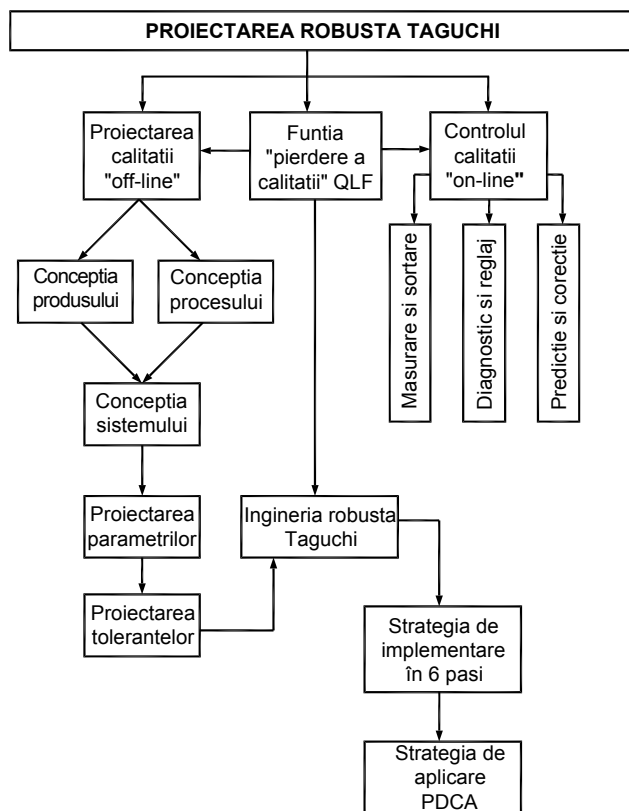


Fig. 6.17 Proiectarea Robustă Taguchi

- Se poate realiza optimizarea simultană a mai multor criterii referitoare la calitate
- se efectuează măsurările relative la diferitele caracteristici de calitate care trebuie optimizate
 - se calculează media $T_{S/N}$ pentru rapoartele S/N corespunzătoare
 - se stabilește pentru fiecare caracteristică tabelul cu răspunsuri și graficul corespunzător
 - se caută acele niveluri ale factorilor care în mod global sunt cele mai eficiente
 - se calculează procentajul contribuției raportului S/N pentru factorii și interacțiunile considerate ca fiind majore.
 - se calculează raportul S/N prin expresia specifică
 - se amplasează într-un tabel rezultatele obținute anterior pentru ansamblul caracteristicilor ce trebuie optimizate
 - se determină nivelul fiecărui factor care dă $\Sigma\%$ contribuției S/N , cea mai mare pentru ansamblul caracteristicilor
 - se realizează afinarea configurației nivelurilor factorilor ținând cont de următoarele aspecte:
 - se pot favoriza unele caracteristici în detrimentul altora
 - adunarea procentuală a contribuției S/N a factorilor relativi la caracteristici disparate trebuie efectuată cu precauție
 - pentru ca îmbunătățirea unei caracteristici să fie relevantă raportul S/N teoretic rezultat trebuie să fie superior raportului S/N mediu al experimentării.

6.4.2 Planuri de experiențe

Planurile de experiențe au fost dezvoltate de Hadamard și Fisher și constau în efectuarea unor experimente stabilite aprioric cu scopul de a determina cu minimum de încercări și maximum de precizie influențele posibile ale diferiților parametri astfel încât să se optimizeze performanțele unui sistem.

Se utilizează trei metode (planuri) de experimentare:

a. Plan de experiențe în care se variază un singur factor o dată (tabelul 6.1)

Este o metodă la care experimentarea se face prin tatonări succesive. Datorită influențelor parazite și întrucât efectele nu sunt întotdeauna independente unele de altele, această metodă se aplică numai cu mare precauție.

Tabelul 6.1

Nr. încercare	Factori încercați							Rezultatul încercării
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	2	1	1	1	1	1	1	R2
3	1	2	1	1	1	1	1	R3
4	1	1	2	1	1	1	1	R4
5	1	1	1	2	1	1	1	R5
6	1	1	1	1	2	1	1	R6
7	1	1	1	1	1	2	1	R7
8	1	1	1	1	1	1	2	R8

b. Plan de experiențe factorial complet (tabelul 6.2)

Acest plan studiază toate combinațiile posibile ale nivelurilor factorilor încercați. Din punct de vedere teoretic ele sunt complete, însă timpul necesar efectuării experimentelor este foarte mare (de exemplu pentru a experimenta 7 factori la 2 niveluri sunt necesare $2^7 = 128$ de experimente).

Tabelul 6.2

Nr. încercare	Factori încercați							Rezultatul încercării
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	1	1	1	2	R2
3	1	2	1	1	1	2	1	R3
4	1	1	2	1	1	2	2	R4
5	1	1	1	1	2	1	1	R5
6	1	1	1	1	2	1	2	R6
7	1	1	1	1	2	2	1	R7
8	1	1	1	1	2	2	2	R8
9	1	1	1	2	1	1	1	R9
10	1	1	1	2	1	1	2	R10
11	1	1	1	2	1	2	1	R11
12	1	1	1	2	1	2	2	R12
13	1	1	1	2	2	1	1	R13
14	1	1	1	2	2	1	2	R14
15	1	1	1	2	2	2	1	R15
16	1	1	1	2	2	2	2	R16
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
126	2	2	2	2	2	1	2	R126
127	2	2	2	2	2	2	1	R127
128	2	2	2	2	2	2	2	R128

c. Plan de experiențe factorial fracționat (tabelul 6.3)

Realizarea acestor planuri se bazează pe ideea că unele combinații posibile ale factorilor încercați aduc mai multe informații eficiente, reușindu-se astfel și reducerea considerabilă a numărului de experimente efectuate. Acest plan nu conține decât 8 încercări, selecționate cu grijă din cele 128 de încercări ale planului factorial complet corespunzător.

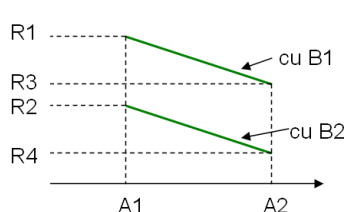
Tabelul 6.3

Nr. încercare	Factori încercați							Rezultatul încercării
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	2	2	2	2	R2
3	1	2	2	1	1	2	2	R3
4	1	2	2	2	2	1	1	R4
5	2	1	2	1	2	1	2	R5
6	2	1	2	2	1	2	1	R6
7	2	2	1	1	2	2	1	R7
8	2	2	1	2	1	1	2	R8

Pentru a putea calcula efectele unui factor independent de alți factori, planul de experiențe trebuie să fie ortogonal.

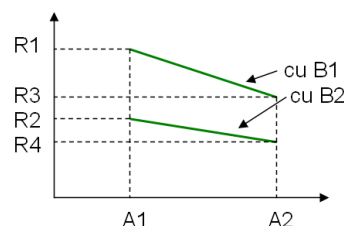
Într-o matrice ortogonală fiecare nivel al fiecărui factor este combinat cu fiecare nivel al celorlalți factori într-un număr egal de ori. Atunci când efectul unui factor depinde de nivelul altui factor se consideră că între aceștia există o interacțiune.

În figura 6.18 se prezintă cazurile posibile ale interacțiunii a doi factori.



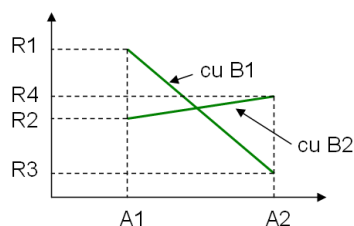
a.

dreptele sunt paralele, efectul lui A este independent de nivelurile B, nu există interacțiune



b.

dreptele nu sunt paralele, efectul lui A nu este independent de nivelurile lui B, există interacțiune



c

dreptele se intersectează, efectul lui A se inversează funcție de nivelurile lui B, există interacțiune foarte puternică

Fig. 6.18 Cazuri posibile de interacțiune a doi factori

Pentru a măsura interacțiunea dintre doi sau mai mulți factori, trebuie rezervată o coloană în matricea de experiențe. În planul factorial complet care conține factorii A, B, C, D, E, F fiecare testat la două niveluri (sunt necesare $2^6 = 64$ încercări). Se introduce o nouă coloană pentru a studia interacțiunea dintre doi factori (I_{AB}). Se constată că nivelurile corespund ca și cum această coloană ar fi alocată unui al șaptelea factor. Calculându-se efectul mediu al celui de-al șaptelea factor se constată că este egal cu efectul interacțiunii (I_{AB}). Acest rezultat indică faptul că în realitate cele două efecte se confundă (sunt congruente). Dacă s-ar alocă de la început coloana a 3-a pentru factorul șapte (interacțiune) s-ar obține un plan factorial fracționat saturat (conține coloane rezervate numai pentru factori independenți), un plan factorial complet pentru 7 factori având nevoie de $2^7 = 128$ încercări (experimente).

Se definește numărul de grade de libertate (gdl) ale unui sistem ca fiind egal cu numărul minim de comparații care se efectuează. Gradul de libertate al unui factor este egal cu numărul de comparații necesare pentru a studia efectul său (de exemplu un factor cu 3 niveluri va avea două grade de libertate). În cazul interacțiunilor, numărul gradelor de libertate este egal cu produsul gradelor de libertate ale factorilor individuali. Numărul de grade de libertate al unei matrici de experiențe este egal cu numărul de încercări (experimente) minus 1. Determinarea numărului de grade de libertate este importantă în vederea alegerii matricii de experiențe adecvate fiecărei aplicații în parte.

Planurile combinate reprezintă o configurație particulară a planurilor de experiențe și sunt folosite pentru studiul sensibilității unui sistem la factorii zgomot bine precizați. În planurile combinate se găsesc atât factorii ținuți sub control (care pilotează sistemul), cât și factorii zgomot (pe care îi suportă sistemul). Se folosesc două matrici de experiență astfel:

- o matrice internă care conține factorii controlați
- o matrice externă care conține factorii zgomot.

Matricea externă are ca scop repetarea fiecărei încercări din matricea internă pentru fiecare configurație a factorilor zgomot.

6.4.3 Matrici de experiențe fracționate ortogonale Taguchi standard

Matricile Taguchi standard se dovedesc suficient de largi pentru a satisface marea majoritate a situațiilor care intervin în practica industrială. Simbolizarea matricilor Taguchi standard se face funcție de numărul de experimente (numărul de linii ale matricii), numărul de factori și interacțiuni (numărul de coloane ale matricii) respectiv numărul de niveluri.

a. Modul de alegere a unei matrici Taguchi standard

Așa cum s-a arătat anterior trebuie aleasă cea mai mică matrice care să furnizeze informațiile dorite în concordanță cu obiectivele experimentului. Se calculează numărul total al gradelor de libertate și se alege matricea Taguchi standard cea mai apropiată.

b. Tabele triunghiulare și grafuri liniare

Tabelele triunghiulare și grafurile liniare sunt asociate majorității matricilor Taguchi standard și se folosesc pentru a defini coloanele utilizate pentru studiul interacțiunilor și pentru adaptarea matricilor la nevoile specifice. Se consideră matricea standard L_8 din tabelul 6.4, tabelul triunghiular corespunzător L_8 din figura 6.19, respectiv grafurile liniare L_8 din figura 6.20.

Tabelul 6.4

Nr. încercare	Factori încercați							Rezultatul încercării
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	R1
2	1	1	1	2	2	2	2	R2
3	1	2	2	1	1	2	2	R3
4	1	2	2	2	2	1	1	R4
5	2	1	2	1	2	1	2	R5
6	2	1	2	2	1	2	1	R6
7	2	2	1	1	2	2	1	R7
8	2	2	1	2	1	1	2	R8

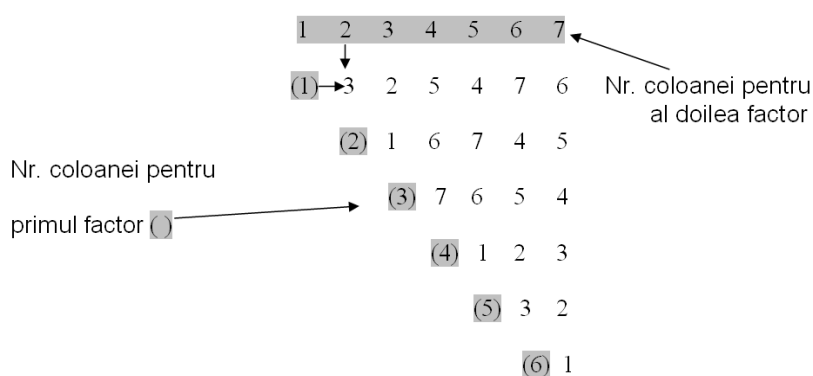


Fig. 6.19 Tabel triunghiular corespunzător matricii L8

Dacă factorii A (viteza) și B (puterea) sunt repartizați în coloanele 1 respectiv 2 din matricea L_8 atunci coloana rezervată interacțiunii între viteză și putere - I_{AB} - se obține la intersecția liniilor corespunzătoare coloanei factorului A respectiv B, adică în coloana 3.

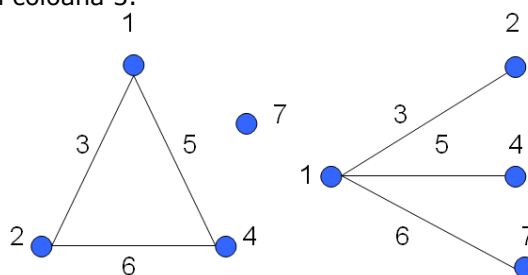


Fig. 6.20 Grafuri liniare asociate matricii L8

Factorii sunt reprezentați prin cercuri, numărul corespunzător fiecăruia fiind cel al coloanei matricii. Numărul coloanei pentru interacțiuni este corespunzător segmentelor de legătură dintre cercuri. De exemplu, dacă factorul A este pe coloana 2 a matricii L_8 și factorul B este pe coloana 4 a matricii L_8 , atunci interacțiunea I_{AB} va fi repartizată pe coloana 6.

Dacă se dorește neglijarea interacțiunii dintre doi factori, numărul segmentului care îi unește poate fi repartizat unui alt factor.

Un graf liniar este reprezentarea grafică a unui tabel triunghiular.

Pentru fiecare matrice Taguchi standard există atâtea grafuri liniare câte combinații posibile ale repartizărilor pot exista:

c. Adaptarea matricilor Taguchi standard

Există cazuri când utilizarea matricilor Taguchi standard nu se poate face direct fiind necesare modificări ale acestora. În primul rând trebuie determinat numărul gradelor de libertate pe care matricea modificată ar trebui să le conțină. Se caută apoi printre matricile Taguchi standard matricea minimă care după modificare răspunde cerințelor impuse. Se pot introduce, în acest mod, factori cu 4 niveluri în matricile cu 2 niveluri etc.

6.4.4 Determinări experimentale privind calitatea suprafețelor prelucrate

În lucrare, se va analiza cazul celor șase factori prezentați mai sus, fiecare cu câte două niveluri și o interacțiune. Pentru optimizarea factorilor în vederea obținerii rugozității dorite pentru suprafața prelucrată a roților dințate s-au utilizat planurile de experiențe clasice și Taguchi, cât și programului Qualitek care aplică metoda Taguchi.

Cele două niveluri la care s-a oprit analiza pentru fiecare factor s-au selectat dintre cele existente, în urma determinării unui interval de variație și a unui centru al experimentului.

În tabelul 6.5 sunt prezentate cele două niveluri ale celor șase factori controlați.

Tabelul 6.5

	Factori	Nivelul 1	Nivelul 2
A	viteza	3000 mm/s	4500 mm/s
B	puterea	170 W	180 W
C	timpul de impus	5 ms	3 ms
D	timpul de repaus	3 ms	5 ms
E	duza/defocusarea	d 4 mm/5 mm	d 4 mm/2,5 mm
F	debitul de gaz	20 l/min	10 l/min

S-au prelucrat câte 5 roți dințate pentru fiecare combinație diferită a nivelurilor factorilor conform configurației din planurile de experiențe și s-au efectuat măsurători de rugozitate pentru fiecare probă.

Starea suprafeței pieselor a fost declarat drept criteriu țintă având în vedere faptul că starea reală a suprafețelor tehnice reprezintă un factor de influență direct asupra comportării elementelor constructive din toate punctele de vedere. Deși este greu de cuantificat prin relații explicite analitic, influența stării suprafeței se manifestă asupra capacității portante, coeficientului de frecare, rezistenței la uzare prin abraziune, adeziune sau coroziune, fiabilității straturilor depuse superficial și chiar asupra aspectului.

Indiferent de material și de procedeul tehnologic de obținere, piesele mecanice sunt afectate de erori de formă și de prezența rugozităților. Caracterul discret al materiei și imperfecțiunile generate de orice procedeu tehnic în condiții reale, conduc la imposibilitatea obținerii unor suprafețe ideale, perfect plane, cilindrice, sferice etc.

În raport cu profilul ideal (nominal) al unei suprafețe, profilul real va prezenta (conform clasificării din STAS 5730/1-89) următoarele tipuri de abateri (fig. 6.21):

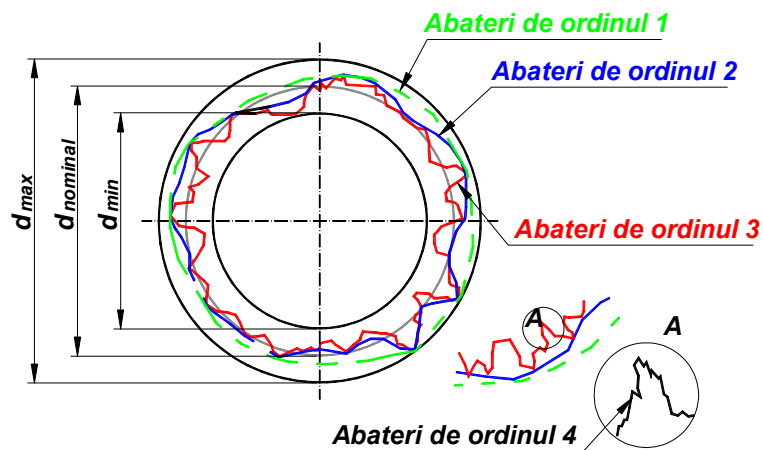


Fig. 6.21 Abateri de la forma nominală a unei suprafețe tehnice

- *abateri de ordinul 1* (de formă), care reprezintă abateri de la forma nominală prescrisă a profilului piesei. Acest tip de erori de formă sunt generate de imprecizia prelucrării mecanice prin factori care depind de condițiile de lucru (deformații elastice ale sistemului tehnologic mașină – sculă – piesă, deformații termice ale componentelor mașinii sau piesei, deformații cauzate de tensiuni interne din substratul piesei, deformații datorate uzării sculei) și factori care nu depind de condițiile de lucru (imprecizia geometrică și cinematică a mașinii, imprecizia de reglare și măsurare a dispozitivelor de control dimensional)
- *abateri geometrice de ordinul 2* (ondulații), care reprezintă neregularități a căror lungime de undă este de câteva ori mai mare decât amplitudinea lor. Ondulațiile pot fi generate paralel sau perpendicular pe direcția de prelucrare și se datorează vibrațiilor din procesul de prelucrare. Ondulațiile longitudinale au amplitudinea și frecvența acestor vibrații, cu caracter, în general sinusoidal. Ondulațiile perpendiculare pe direcția de deplasare a sculei sunt mai puțin importante, fiind mai mici decât cele longitudinale
- *abateri geometrice de ordinul 3* (rugozități), care reprezintă caracteristica principală în topografia unei suprafețe și se materializează printr-o succesiune de proeminențe și goluri.

Se mai pot defini abateri de ordinul patru sau mai mare ca fiind smulgeri, urme de sculă, goluri aperiodice etc.

La proiectarea unei piese se prescriu direct indicații referitoare la abaterile de formă și la rugozitate. Aceasta este evaluată printr-un set de parametri, care, generic descriu "starea suprafeței".

Evaluarea rugozității se poate aborda clasic, bidimensional (prin înregistrarea profilului într-o direcție dată și perpendicular pe suprafața de interes și prelucrarea elementelor de geometrie a profilului în scopul obținerii unor parametri standardizați) sau tridimensional (prin maparea suprafeței prin diverse metode – baleierea suprafeței pe principiul abordării clasice, planimetrarea simultană a întregii arii cu mijloace optice – și convertirea informației primare într-un model matematic, care permite extragerea unui set mai extins de parametri).

La scară industrială și pentru tehnologii de execuție tradiționale se utilizează, în marea majoritate a cazurilor, evaluarea bidimensională.

Măsurarea rugozității reprezintă o operație delicată și scumpă, datorită echipamentelor care reclamă o precizie suficient de ridicată pentru a furniza rezultate de încredere la scara micrometrică a profilului.

Principial, măsurarea rugozității se poate realiza prin palpate mecanică sau optică. O comparație a metodelor mecanice și optice, având drept criteriu precizia de redare a profilului, indică performanțe mai bune ale palpării mecanice.

Determinarea parametrilor de rugozitate presupune prelucrarea statistică a datelor furnizate de o profilogramă. Aceasta se prezintă ca o curbă $y(x)$, direcția axei x fiind paralelă cu profilul nominal, iar direcția axei y fiind perpendiculară pe aceasta.

Conform standardului citat, care în mare măsură coincide cu normativele europene, britanice și americane, cei mai importanți parametri de rugozitate sunt:

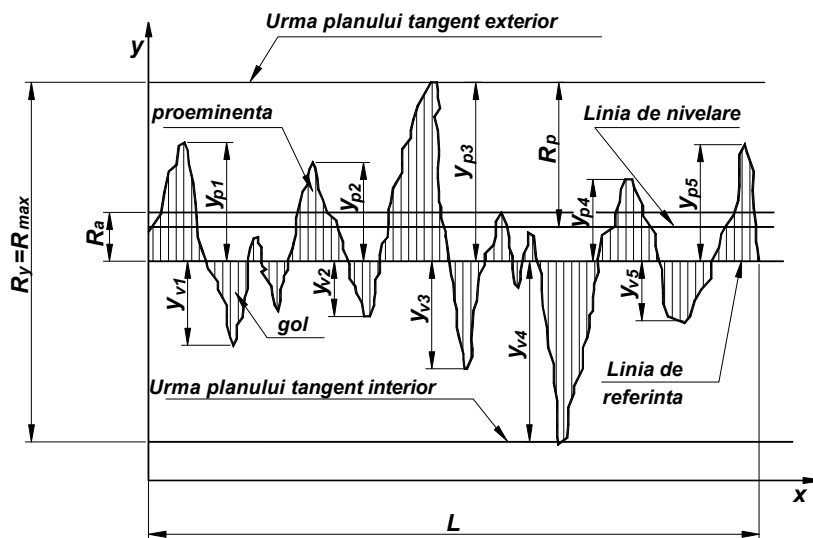


Fig. 6.22 Profilogramă cu figurarea principalilor parametri de rugozitate

- abaterea medie a profilului față de linia medie (fig. 6.22):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (6.1)$$

unde $y(x)$ este înălțimea profilului în raport cu o orizontală oarecare, paralelă cu direcția de deplasare a sculei

L - lungimea de referință (mărime indicată în standard funcție de valoarea estimată a parametrului R_a . Există, de asemenea, recomandarea trasării profilului pe cel puțin cinci lungimi de referință. Valorile standardizate ale lungimii de referință sunt 0.08; 0.25; 0.8; 2.5; 25 mm)

n - număr de măsurări ale înălțimilor y ale profilului (practic, lungimea profilului se împarte în $n-1$ intervale echidistante și se fac măsurări în n puncte discrete)

i - numărul curent al punctului în care se măsoară înălțimea y .

Parametrul R_a se măsoară de la linia medie sau de referință a profilului (determinată ca acea linie pentru care abaterea medie pătratică a profilului este minimă)

- abaterea medie pătratică a profilului:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}, \quad (6.2)$$

Abaterea medie pătratică a profilului este o mărime de calcul care nu are corespondent fizic.

- înălțimea maximă a rugozităților:

$$R_{\max} = |y_{p\max}| + |y_{v\max}|, \quad (6.3)$$

unde $y_{p\max}$ este cota celei mai înalte proeminențe care apare pe intervalul de măsurare,

$y_{v\min}$ - cota celui adânc gol care apare pe intervalul de măsurare.

În alte standarde R_{\max} este echivalent cu R_y .

R_{\max} determină poziția planelor tangente exterior și interior la profil.

- înălțimea rugozităților în zece puncte:

$$R_z = \frac{1}{5}(y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + y_{p4} + y_{p5}) - \frac{1}{5}(y_{v1} + y_{v2} + y_{v3} + y_{v4} + y_{v5}), \quad (6.4)$$

unde $y_{p1...5}$ reprezintă cotele celor mai înalte cinci proeminențe care apar pe lungimea profilului

$y_{v1...5}$ - cotele celor mai adânci cinci goluri care apar pe lungimea profilului.

Normativul german DIN definește în mod diferit parametrul R_z :

$$R_{zDIN} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 R_{ti} \right) = \frac{1}{5} (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5}), \quad (6.5)$$

unde R_{ti} reprezintă înălțimea maximă a profilului pe cinci segmente în care este împărțită lungimea de referință.

- adâncimea de nivelare:

$$R_p = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx, \quad (6.6)$$

Parametrul R_p reprezintă cota la care s-ar genera o suprafață perfect netedă prin redistribuirea proeminențelor în goluri și se măsoară de la planul tangent exterior.

- lungimea de undă a undulațiilor profilului: W .

Pentru o caracterizare mai detaliată, profilogramele mai pot fi prelucrate pentru a furniza și alți parametri mai sofisticăți, cum ar fi: înălțimea medie a proeminențelor și a golurilor, cea mai mare cotă a proeminențelor și golurilor (raportate la linia medie), panta proeminențelor, densitatea vârfurilor suprafeței, coeficientul de asimetrie al profilului etc.

Literatura de specialitate indică relații aproximative între principalii parametri de rugozitate:

$$R_z \cong 4.5R_a^{0.97}, \quad (6.7)$$

$$R_{\max} \cong 93.325R_a^{0.98} \cong 20.41R_z^{1.01}, \quad (6.8)$$

$$R_q \cong (1.25...1.3)R_a. \quad (6.9)$$

În toată lumea cel mai utilizat parametru de rugozitate este R_a , a cărei valoare este înscrisă pe desenele de execuție ca indicație pentru starea suprafeței.

Pentru a caracteriza contactul a două suprafețe este necesară cunoașterea abaterilor de ordinul 1, 2 și 3 pentru ambele suprafețe. Abaterile de ordinul 1 și 2 sunt mai ușor de măsurat, dar influența lor asupra comportării suprafețelor în contact este mai greu de cuantificat. Se introduc noțiunile de apropiere absolută și relativă a suprafețelor.

Abaterile de la forma ideală a suprafețelor sugerează faptul că, la o apropiere relativă oricât de ridicată, practic, contactul nu va avea loc pe aria nominală (determinată de dimensiunile geometrice nominale, macroscopice ale acestora). Aria reală de contact va fi doar o anumită parte din aria nominală, mărimea ariei reale fiind determinată de suma microariilor rugozităților care vin în contact direct. Se definesc noțiunile de aria nominală, aparentă și reală de contact (fig. 6.23).

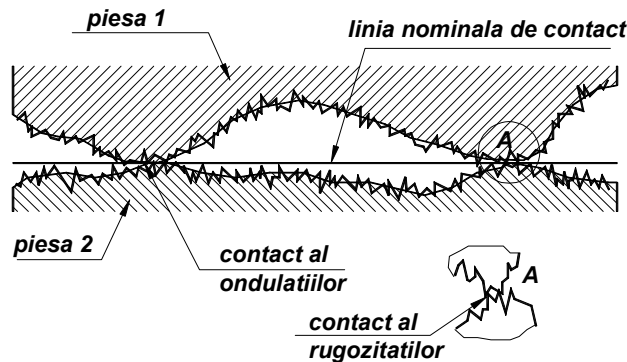


Fig. 6.23 Linia teoretică de contact, contactul undulațiilor și al rugozităților

Aria aparentă reprezintă suma ariilor de contact ale undulațiilor suprafețelor în contact.

Între cele trei tipuri de arii există relația generală:

$$A_n \geq A_a \geq A_r, \quad (6.10)$$

unde A_n este aria reală de contact

A_a – aria aparentă de contact

A_r – aria reală de contact.

Pentru cuplele tribologice de clasă I (contact punctiform) se admite egalitatea acestor arii. Pentru cuplele de clasă II (contact liniar) se admite egalitatea ariei reale cu cea aparentă. Pentru cuplele tribologice de clasă III (contact pe suprafață), însă, aria reală este cu două, trei sau mai multe ordine de mărime mai mică decât aria nominală, fapt care are implicații directe asupra presiunii reale de contact și asupra portanței cuplei.

Apropierea absolută a două suprafețe are o valoare care se află într-un interval mărginit teoretic de R_{max} și 0.

Se definește apropierea relativă ca raport al apropierii absolute și înălțimea maximă a rugozităților:

$$\varepsilon = \frac{a}{R_{max}}, \quad (6.11)$$

unde ε este apropierea relativă,

a – apropierea absolută.

Apropierea absolută este dificil de măsurat experimental. Pentru apropierea relativă, în aplicațiile curente, sunt valabile valori de aproximativ 0.4.

Pentru a aprecia media și variabilitatea rezultatelor relative la experiment, adică la configurația determinată a nivelurilor diferiților factori, s-au realizat 40 piese (roți dințate), conform celor 8 combinații de factori, asupra cărora s-au efectuat măsurători cu un rugozimetru electronic de tip Mahr, obținându-se profile de rugozitate R și parametri R_a , R_q , R_z , R_{zj} , R_{max} , R_p , R_v .

Sunt prezentate în continuare perechi de tabele și profilogramele aferente experimentelor corespunzătoare celor opt combinații de factori, utilizate pentru realizarea unor eșantioane de câte cinci piese. Combinațiile au fost simbolizate cu majusculele A...H, iar experimentele (piesele) se identifică prin simbolul experimentului și numărul de ordine din eșantion (1...5).

Valorile factorilor de proces pentru combinația A Tabelul 6.6

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	3000 mm/min	1
2. puterea	170 W	1
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	1
4. timpul de impuls	5 ms	1
5. timpul de repaus	3 ms	1
6. duza / distanța	4 mm / 5 mm	1
7. debitul de gaz	20 l/min	1

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația A Tabelul 6.7

A	R_a	R_q	R_z	R_{zj}	R_{max}	R_p
A1	1,027	1,243	3,958	5,275	1,579	2,380
A2	0,895	1,147	3,945	6,150	2,091	1,853
A3	0,977	1,274	3,922	4,97	1,714	2,208
A4	0,944	1,125	3,101	3,814	1,683	1,418
A5	0,867	1,037	3,750	4,653	1,946	1,804
	0,942	1,165	3,735	4,972	1,802	1,932

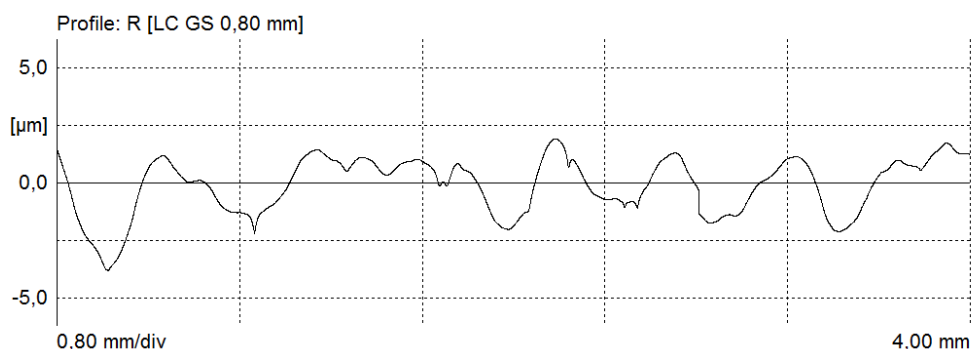


Fig. 6.24 Profilul R pentru combinația de factori A/experimentul 1

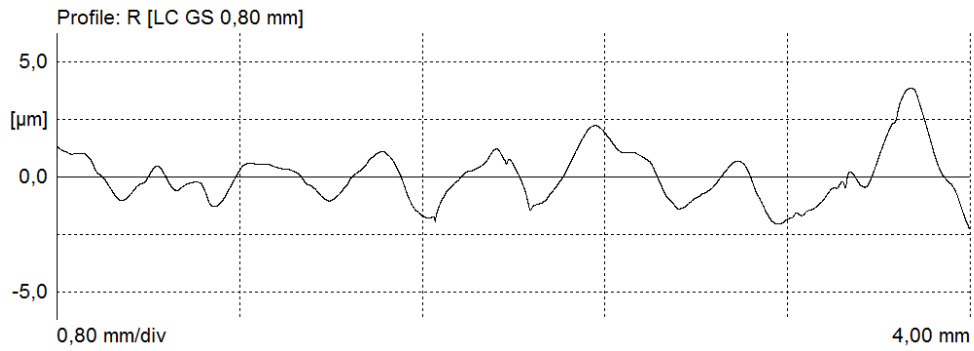


Fig. 6.25 Profilul R pentru combinația de factori A/experimentul 2

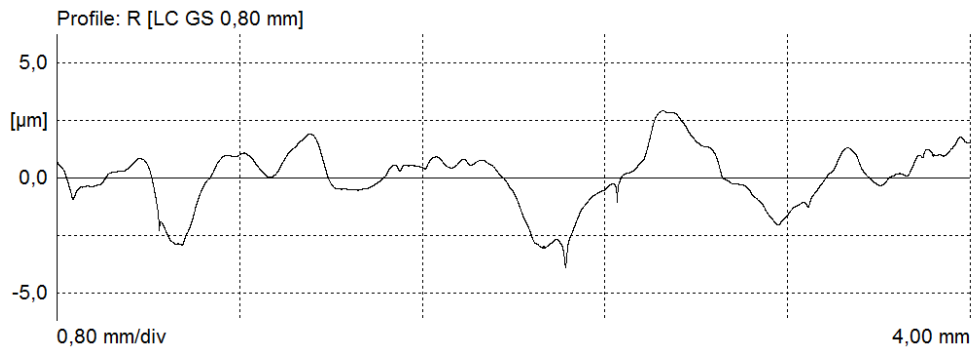


Fig. 6.26 Profilul R pentru combinația de factori A/experimentul 3

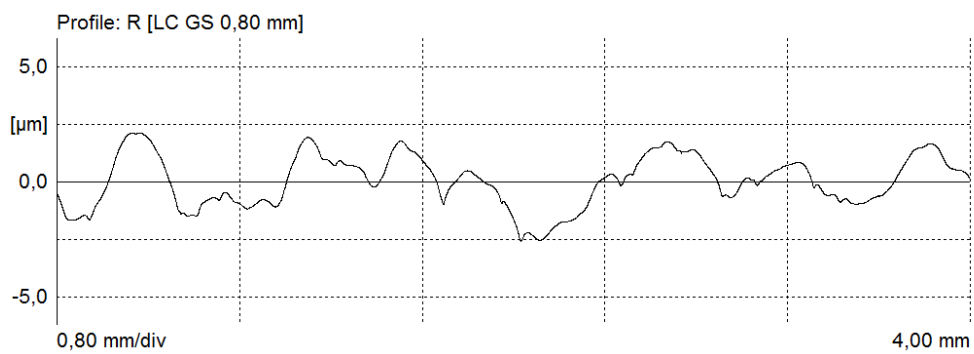


Fig. 6.27 Profilul R pentru combinația de factori A/experimentul 4

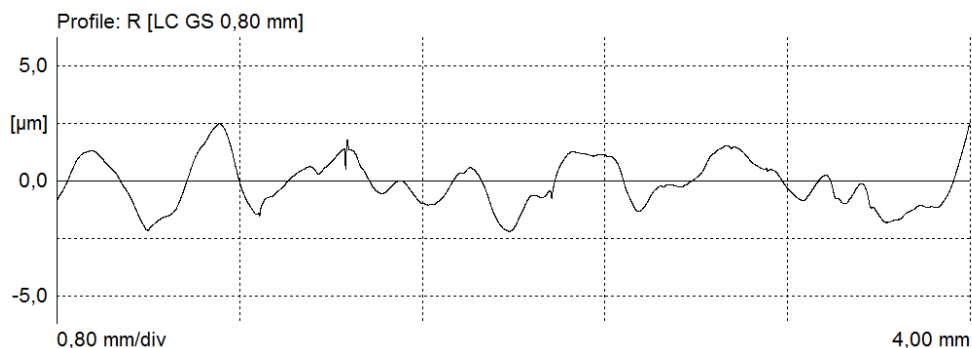


Fig. 6.28 Profilul R pentru combinația de factori A/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația B Tabelul 6.8

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	3000 mm/min	1
2. puterea	170 W	1
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	1
4. timpul de impuls	3 ms	2
5. timpul de repaus	5 ms	2
6. duza / distanța	4 mm / 2,5 mm	2
7. debitul de gaz	10 l/min	2

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația B Tabelul 6.9

B	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
B1	1,498	2,059	6,687	11,02	2,841	3,846	1,498
B2	1,327	1,591	5,397	6,777	2,466	2,93	1,327
B3	1,242	1,542	5,682	8,174	2,726	2,956	1,242
B4	1,520	2,021	7,528	11,84	3,979	3,549	1,520
B5	1,591	2,015	7,017	10,51	3,284	3,733	1,591
	1,435	1,845	6,462	9,664	3,059	3,402	1,435

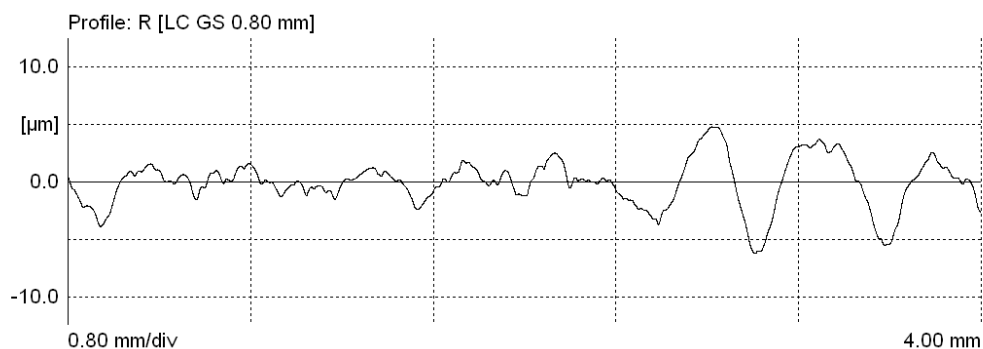


Fig. 6.29 Profilul R pentru combinația de factori B/experimentul 1

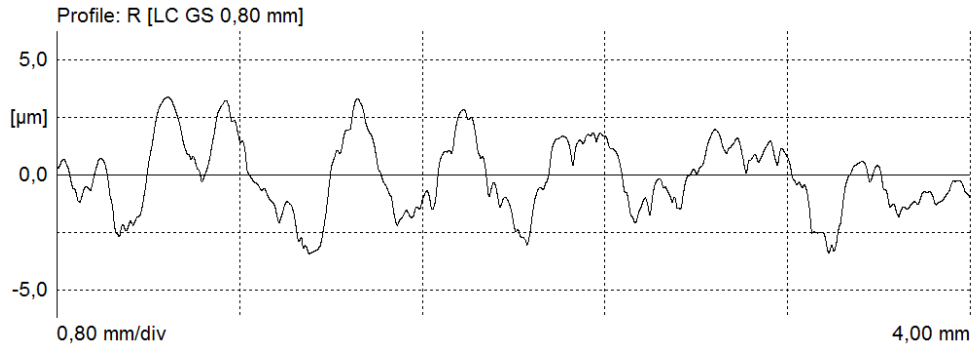


Fig. 6.30 Profilul R pentru combinația de factori B/experimentul 2

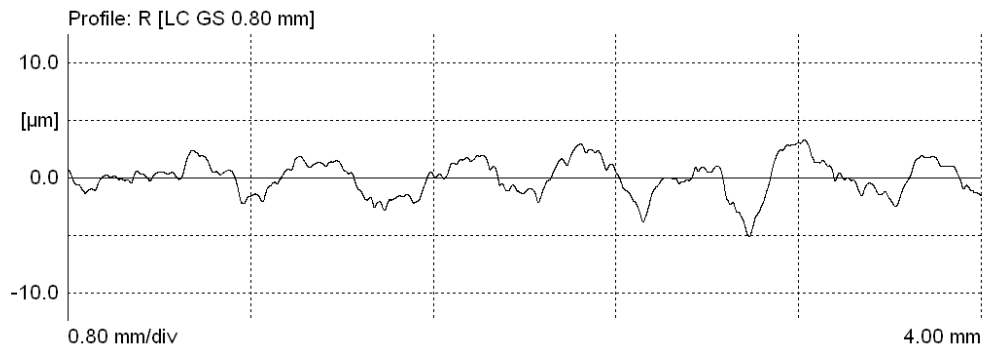


Fig. 6.31 Profilul R pentru combinația de factori B/experimentul 3

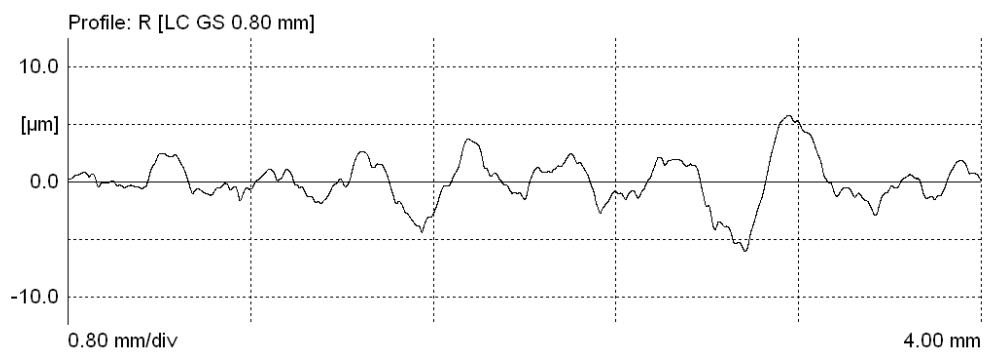


Fig. 6.32 Profilul R pentru combinația de factori B/experimentul 4

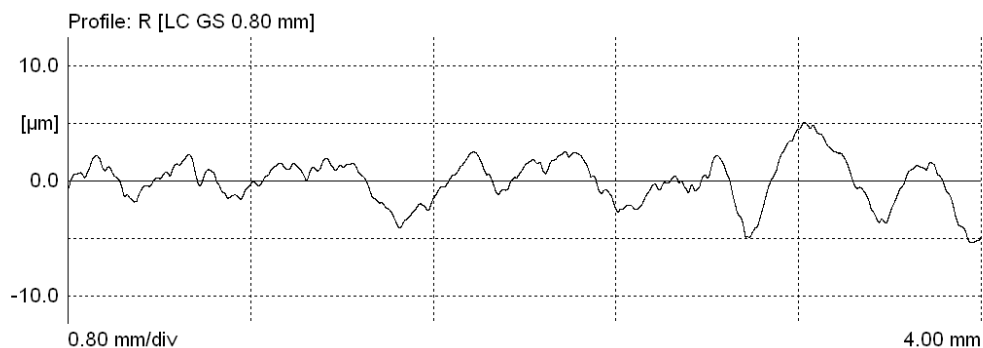


Fig. 6.33 Profilul R pentru combinația de factori B/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația C Tabelul 6.10

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	3000 mm/min	1
2. puterea	180 W	2
3. interacțiunea 1x2	int. 1 x 2	2
4. timpul de impuls	5 ms	1
5. timpul de repaus	3 ms	1
6. duza / distanța	4 mm / 2,5 mm	2
7. debitul de gaz	10 l/min	2

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația C Tabelul 6.11

C	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
C1	0,496	0,610	2,358	3,387	1,237	1,120	0,496
C2	0,712	0,874	2,742	3,242	1,536	1,206	0,712
C3	0,525	0,651	2,222	3,194	1,141	1,081	0,525
C4	0,725	1,562	3,074	5,442	1,562	1,512	0,725
C5	0,714	0,873	2,823	4,174	1,535	1,287	0,714
	0,634	0,914	2,644	3,888	1,402	1,241	0,634

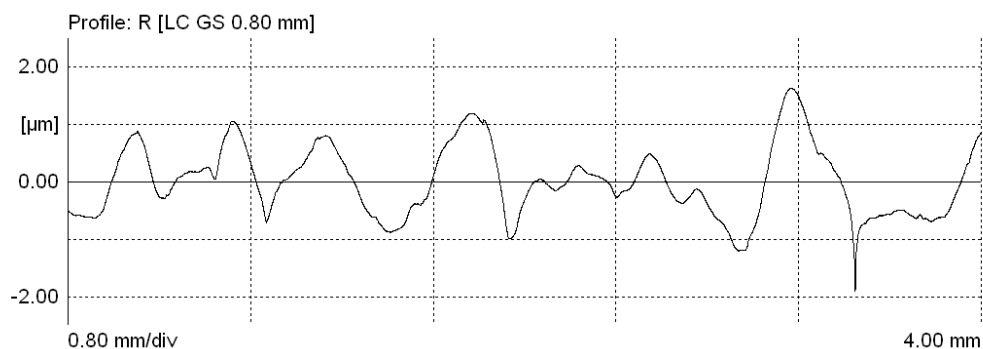


Fig. 6.34 Profilul R pentru combinația de factori C/experimentul 1

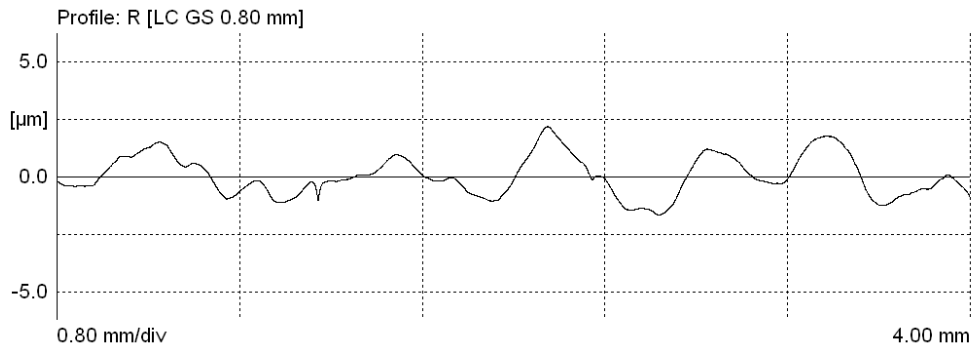


Fig. 6.35 Profilul R pentru combinația de factori C/experimentul 2

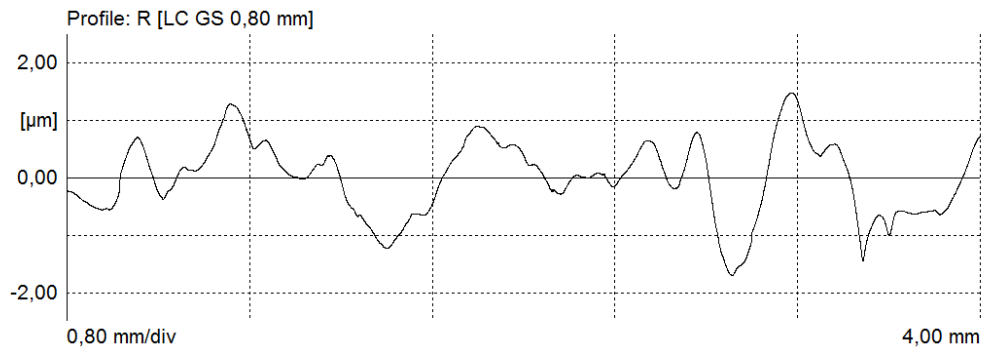


Fig. 6.36 Profilul R pentru combinația de factori C/experimentul 3

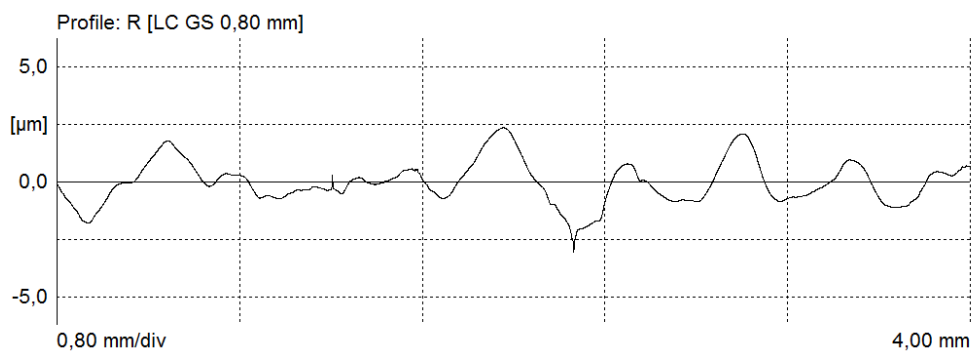


Fig. 6.37 Profilul R pentru combinația de factori C/experimentul 4

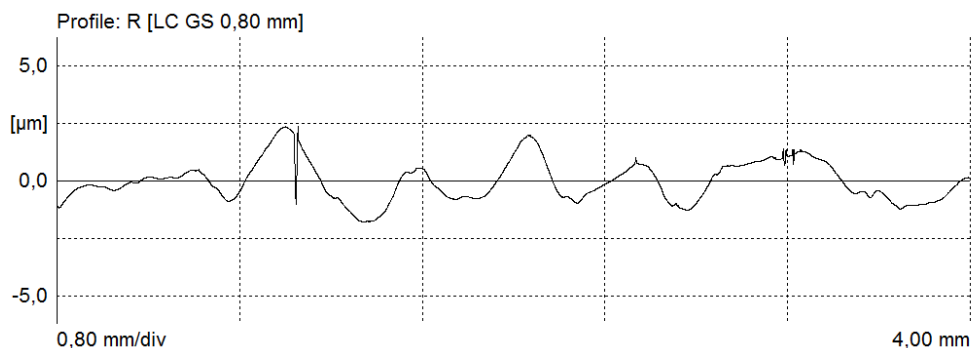


Fig. 6.38 Profilul R pentru combinația de factori C/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația D Tabelul 6.12

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	3000 mm/min	1
2. puterea	180 W	2
3. interacțiunea 1x2	int. 1 x 2	2
4. timpul de impuls	3 ms	2
5. timpul de repaus	5 ms	2
6. duza / distanța	4 mm / 5 mm	1
7. debitul de gaz	20 l/min	1

Parametrii de rugozitate mășurați pentru combinația D Tabelul 6.13

D	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
D1	1,415	1,835	6,642	8,628	3,074	3,569	1,415
D2	1,189	1,507	4,618	7,120	2,214	2,404	1,189
D3	1,145	1,416	5,207	6,757	2,542	2,665	1,145
D4	1,337	1,688	5,804	8,797	2,865	2,939	1,337
D5	1,379	1,683	6,116	7,402	3,077	3,039	1,379
	1,293	1,626	5,677	7,741	2,754	2,923	1,293

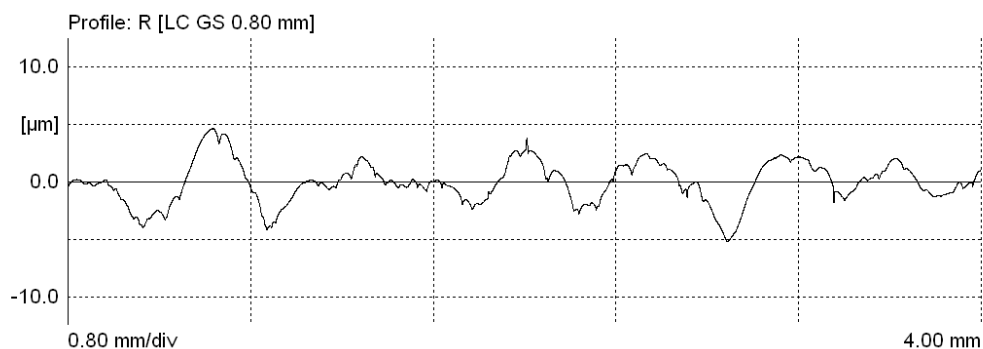


Fig. 6.39 Profilul R pentru combinația de factori D/experimentul 1

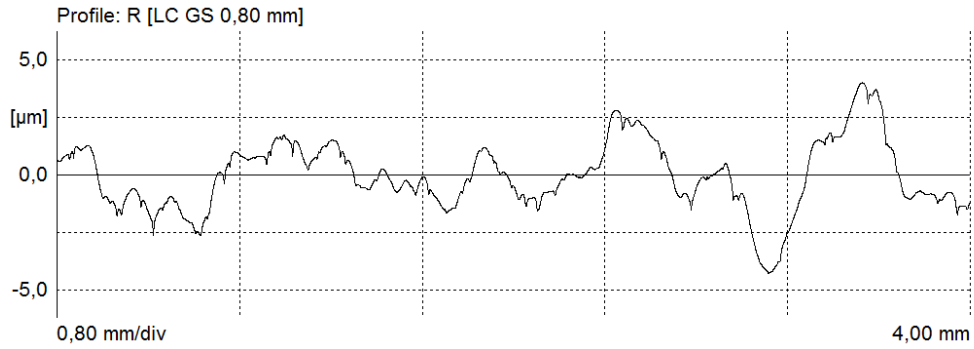


Fig. 6.40 Profilul R pentru combinația de factori D/experimentul 2

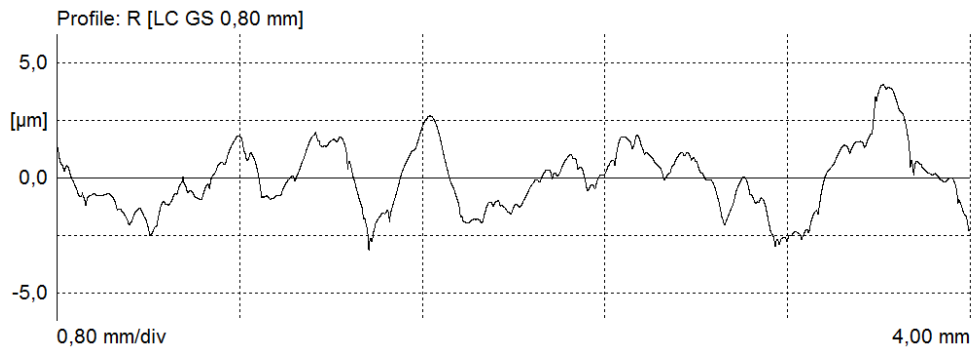


Fig. 6.41 Profilul R pentru combinația de factori D/experimentul 3

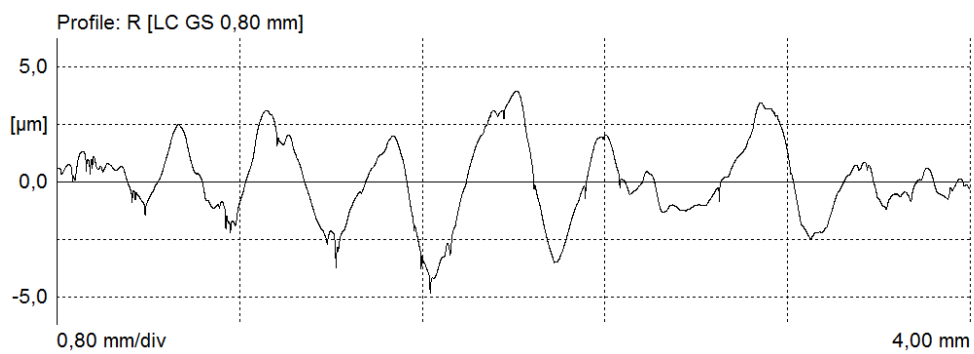


Fig. 6.42 Profilul R pentru combinația de factori D/experimentul 4

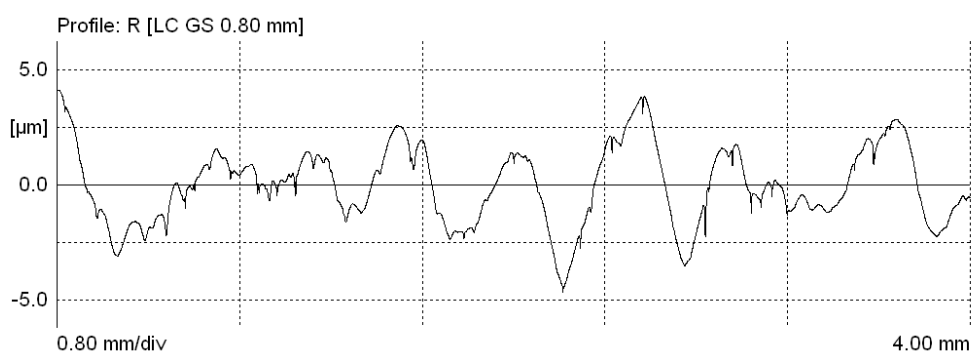


Fig. 6.43 Profilul R pentru combinația de factori D/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația E Tabelul 6.14

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	4500 mm/min	2
2. puterea	170 W	1
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	2
4. timpul de impuls	5 ms	1
5. timpul de repaus	5 ms	2
6. duza / distanța	4 mm / 5 mm	1
7. debitul de gaz	10 l/min	2

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația E Tabelul 6.15

E	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
E1	1,275	1,572	5,664	7,740	2,120	3,543	1,275
E2	1,282	1,579	5,720	7,067	2,585	3,135	1,282
E3	1,354	1,630	5,275	7,235	2,739	2,537	1,354
E4	1,175	1,447	4,697	7,318	2,318	2,379	1,175
E5	1,305	1,613	5,578	7,449	2,906	2,672	1,305
	1,278	1,568	5,387	7,362	2,534	2,853	1,278

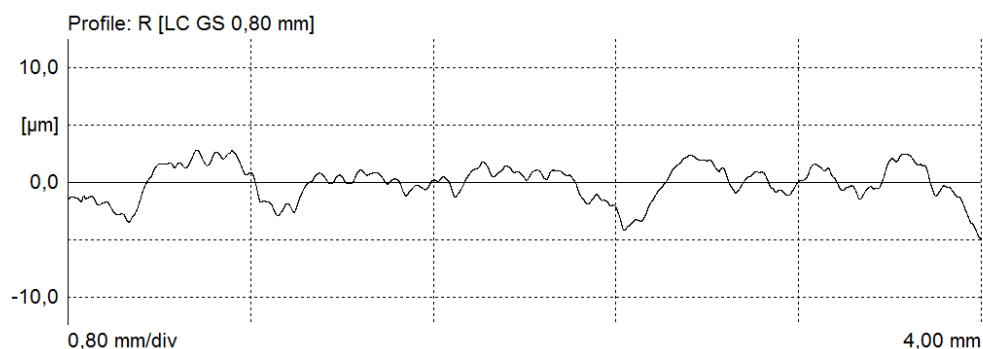


Fig. 6.44 Profilul R pentru combinația de factori E/experimentul 1

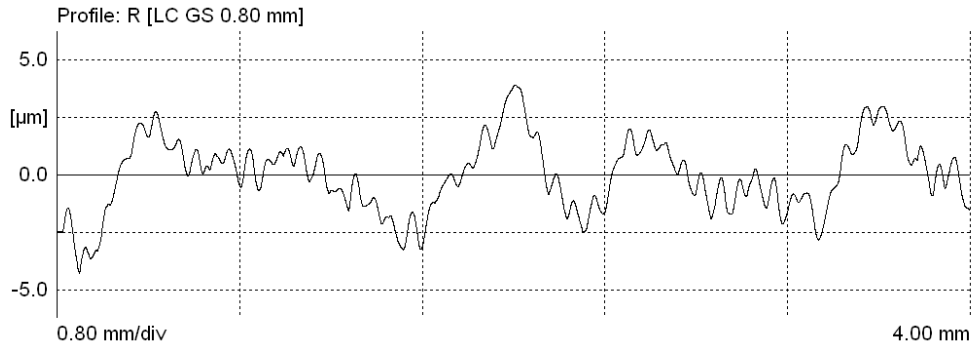


Fig. 6.45 Profilul R pentru combinația de factori E/experimentul 2

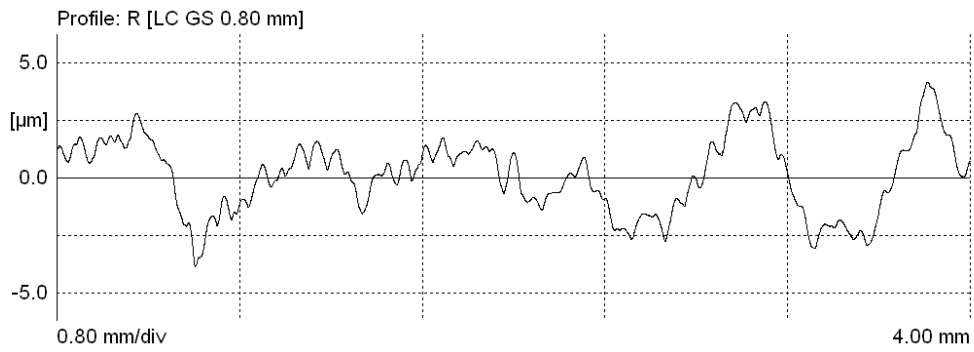


Fig. 6.46 Profilul R pentru combinația de factori E/experimentul 3

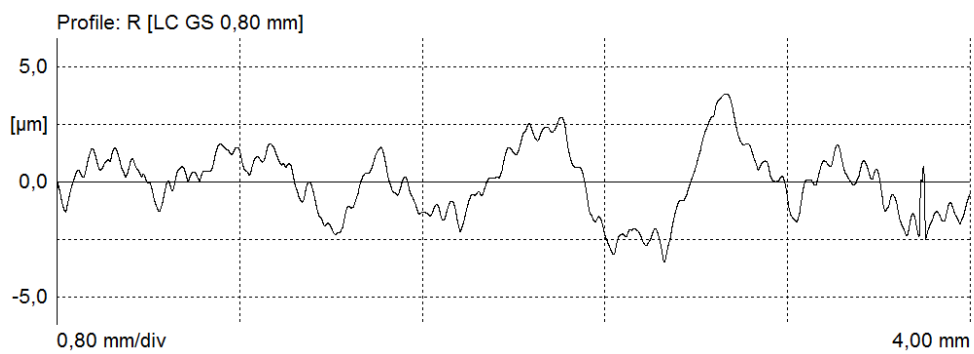


Fig. 6.47 Profilul R pentru combinația de factori E/experimentul 4

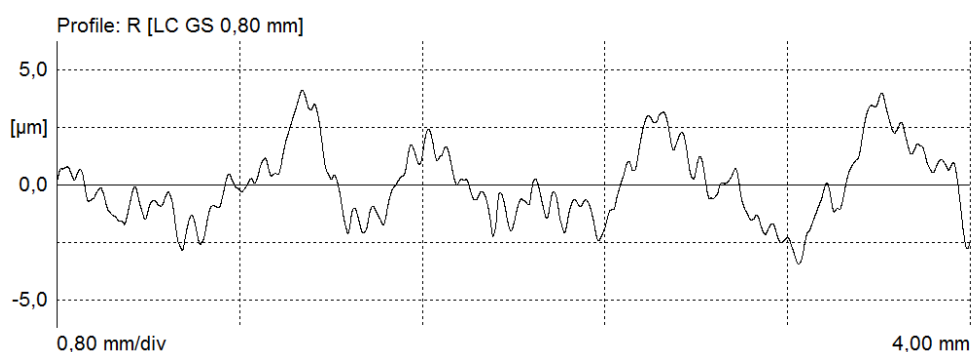


Fig. 6.48 Profilul R pentru combinația de factori E/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația F Tabelul 6.16

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	4500 mm/min	2
2. puterea	170 W	1
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	2
4. timpul de impuls	3 ms	2
5. timpul de repaus	3 ms	1
6. duza/distanța	4 mm / 2,5 mm	2
7. debitul de gaz	20 l/min	1

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația F Tabelul 6.17

F	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
F1	1,092	1,426	4,857	7,920	2,356	2,501	1,092
F2	0,982	1,216	4,191	5,062	2,176	2,015	0,982
F3	0,969	1,296	4,596	6,950	2,026	2,570	0,969
F4	1,092	1,364	4,568	6,085	2,335	2,233	1,092
F5	0,928	1,129	3,911	4,731	2,088	1,823	0,928
	1,013	1,286	4,425	6,150	2,196	2,228	1,013

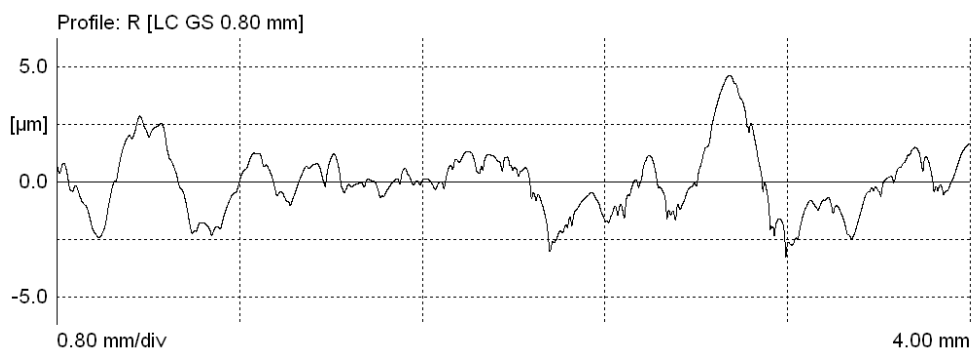


Fig. 6.49 Profilul R pentru combinația de factori F/experimentul 1

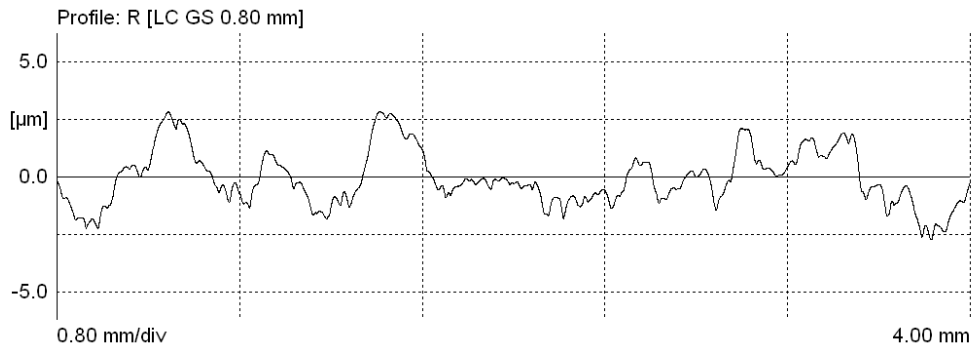


Fig. 6.50 Profilul R pentru combinația de factori F/experimentul 2

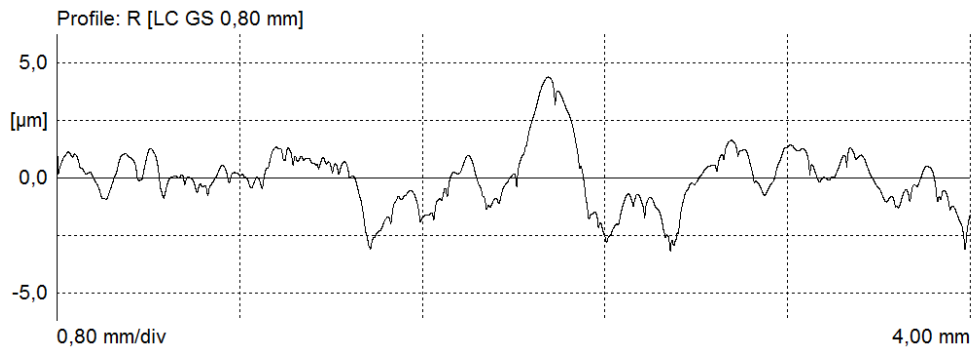


Fig. 6.51 Profilul R pentru combinația de factori F/experimentul 3

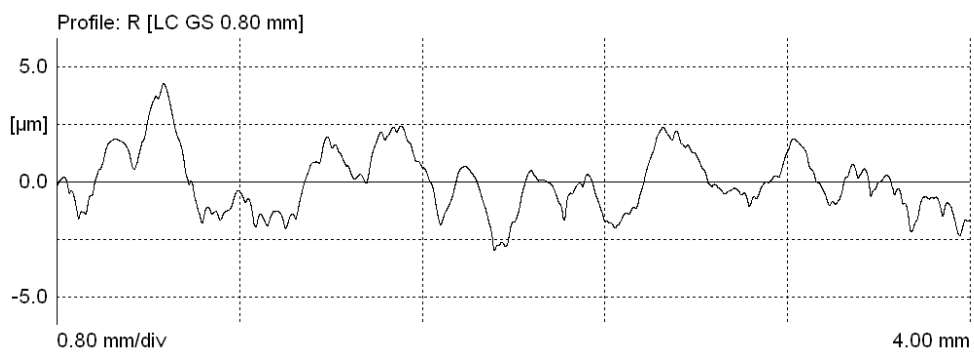


Fig. 6.52 Profilul R pentru combinația de factori F/experimentul 4

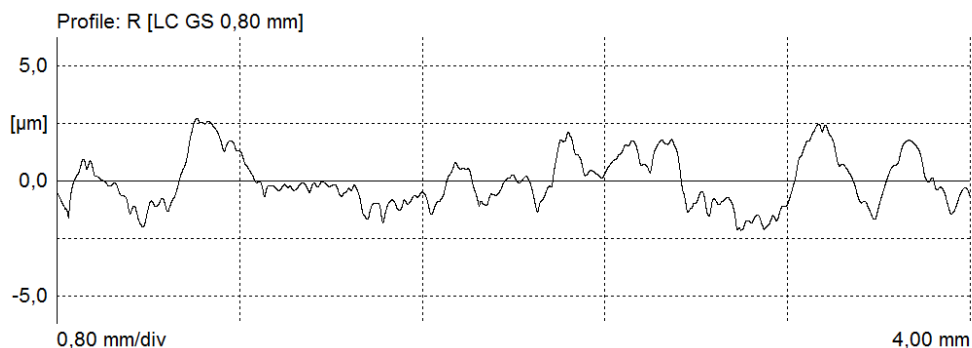


Fig. 6.53 Profilul R pentru combinația de factori F/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația G Tabelul 6.18

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	4500 mm/min	2
2. puterea	180 W	2
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	1
4. timpul de impuls	5 ms	1
5. timpul de repaus	5 ms	2
6. duza / distanța	4 mm / 2,5 mm	2
7. debitul de gaz	20 l/min	1

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația G Tabelul 6.19

G	R_a	R_q	R_z	R_{zj}	R_{max}	R_p	R_v
G1	1,104	1,409	5,261	6,877	2,684	2,577	1,104
G2	0,987	1,213	4,859	6,644	2,197	2,662	0,987
G3	0,978	1,243	4,791	6,668	2,153	2,638	0,978
G4	1,054	1,412	5,060	6,714	3,103	1,957	1,054
G5	1,058	1,303	3,770	4,995	1,888	1,881	1,058
	1,036	1,316	4,748	6,380	2,405	2,343	1,036

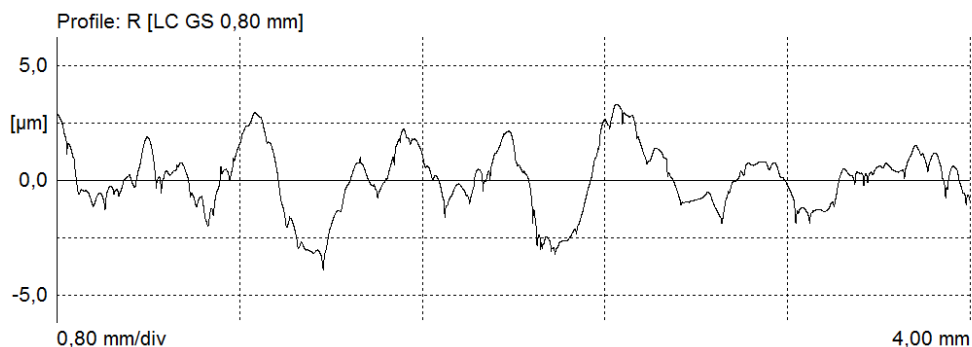


Fig. 6.54 Profilul R pentru combinația de factori G/experimentul 1

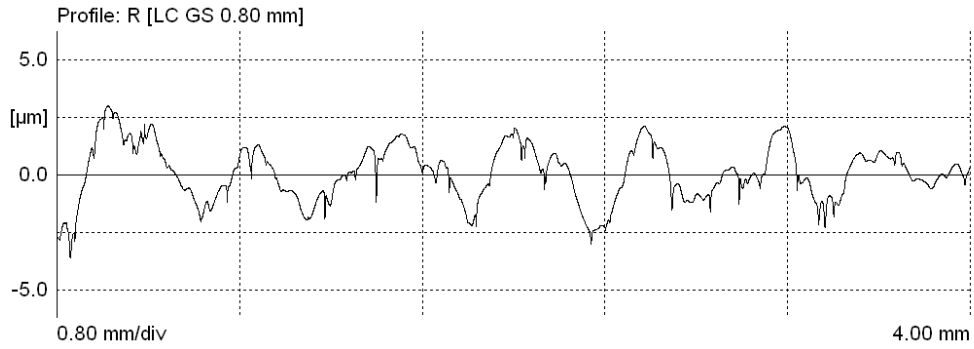


Fig. 6.55 Profilul R pentru combinația de factori G/experimentul 2

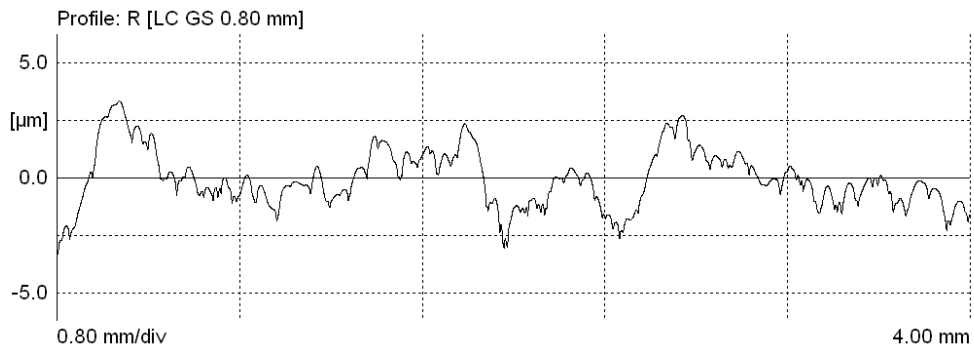


Fig. 6.56 Profilul R pentru combinația de factori G/experimentul 3

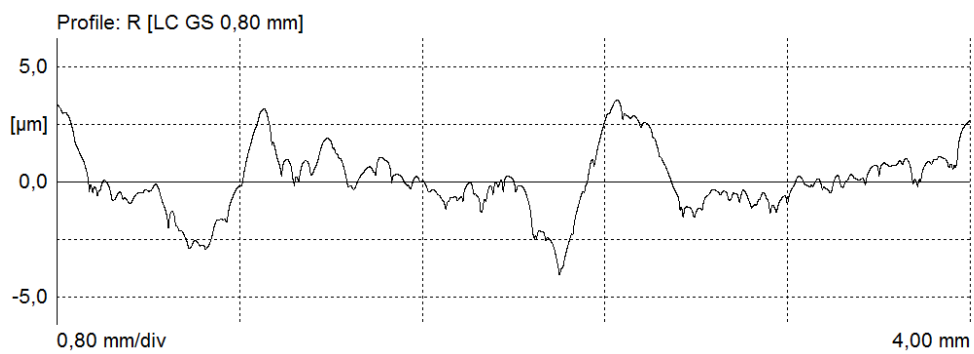


Fig. 6.57 Profilul R pentru combinația de factori G/experimentul 4

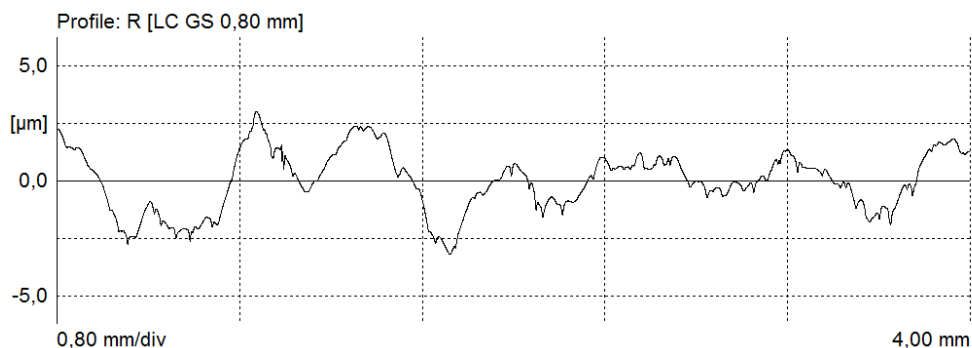


Fig. 6.58 Profilul R pentru combinația de factori G/experimentul 5

Valorile factorilor de proces pentru combinația H Tabelul 6.20

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	4500 mm/min	2
2. puterea	180 W	2
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	1
4. timpul de impuls	3 ms	2
5. timpul de repaus	3 ms	1
6. duza / distanța	4 mm / 5 mm	1
7. debitul de gaz	10 l/min	2

Parametrii de rugozitate măsurați pentru combinația H Tabelul 6.21

H	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
H1	1,175	1,437	5,118	6,310	2,573	2,545	1,175
H2	1,179	1,530	5,121	7,726	2,954	2,167	1,179
H3	1,165	1,409	4,634	6,210	2,194	2,440	1,165
H4	1,164	1,526	4,820	6,652	1,917	2,904	1,164
H5	1,151	1,420	4,821	5,499	2,707	2,114	1,151
Media	1,167	1,464	4,903	6,479	2,469	2,434	1,167

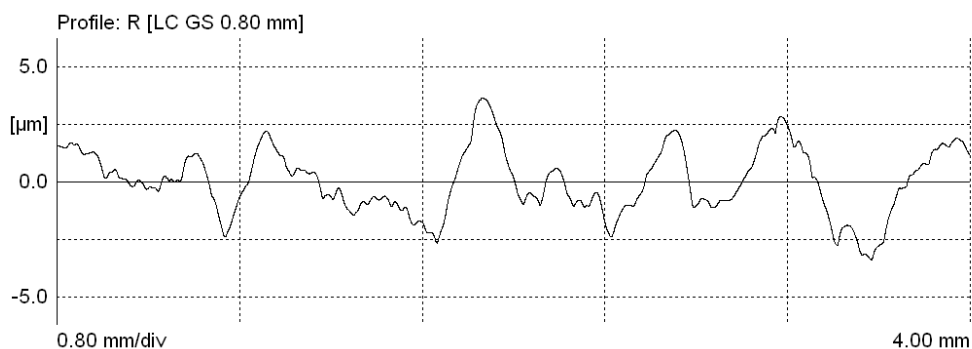


Fig. 6.59 Profilul R pentru combinația de factori H/experimentul 1

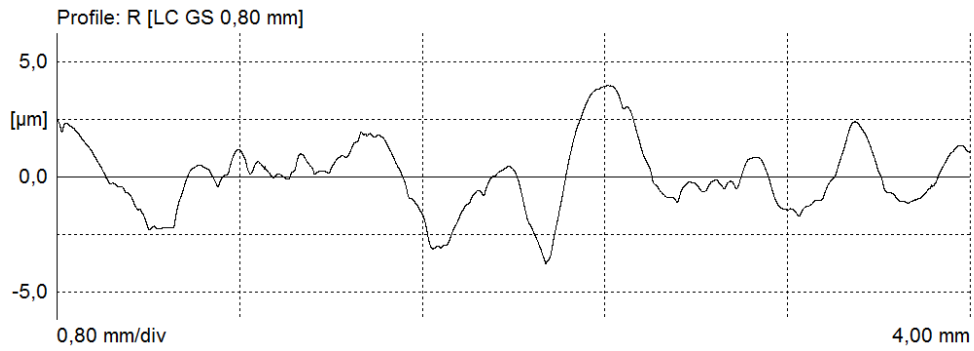


Fig. 6.60 Profilul R pentru combinația de factori H/experimentul 2

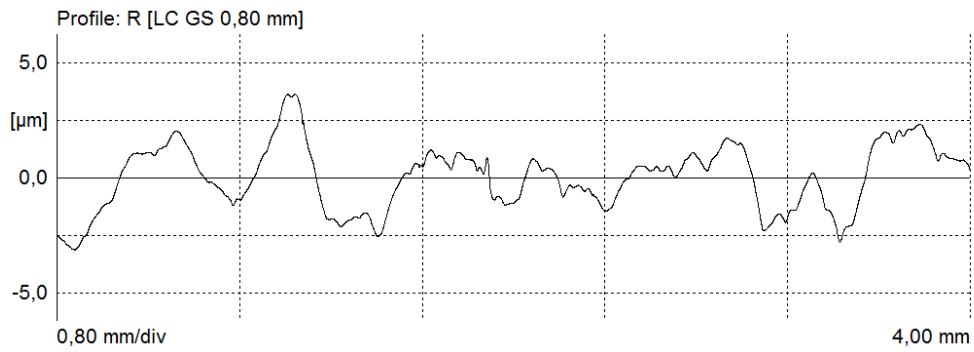


Fig. 6.61 Profilul R pentru combinația de factori H/experimentul 3

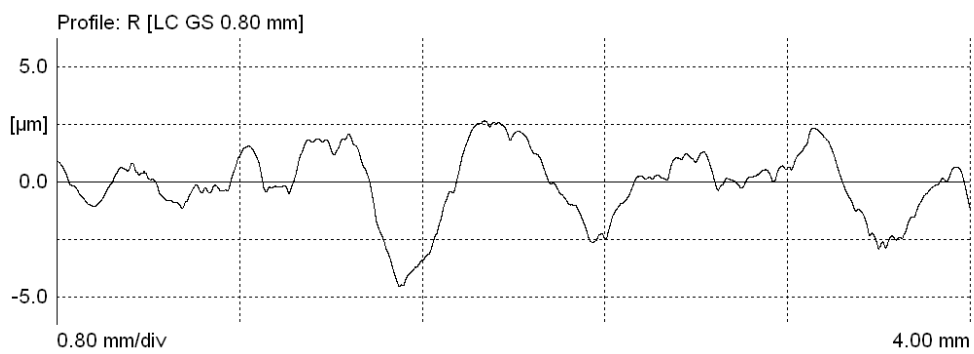


Fig. 6.62 Profilul R pentru combinația de factori H/experimentul 4

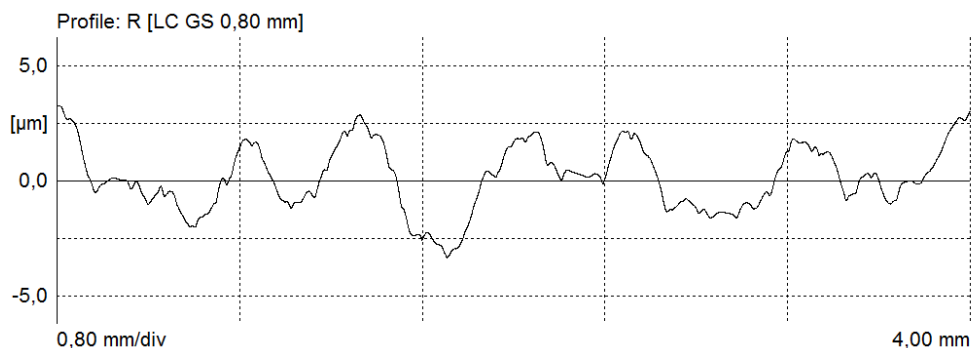


Fig. 6.63 Profilul R pentru combinația de factori H/experimentul 5

6.4.5 Planuri de experiențe clasice

Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe clasic presupune următoarele etape:

- se consideră un criteriu de calitate de optimizat (calitatea suprafeței prelucrate - rugozitatea) de tip țintă. S-a determinat că sunt necesari 6 factori la 2 niveluri A (viteza), B (puterea), C (timpul de impuls), D (timpul de repaus), E (defocusarea), F (debitul de gaz), și o interacțiune AB.
- se caută cea mai mică matrice compatibilă cu scopurile experimentului. Se alege o matrice L_8 în care coloana 3 a fost rezervată pentru studiul interacțiunii AB.

Tabelul 6.22

Nr. încercare	Factori controlați						
	A	B	Int. AB	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

(6 factori la 2 niveluri și o interacțiune)

- se execută 5 roți dințate pentru fiecare combinație de factori
- pentru fiecare încercare se calculează media celor 5 măsurări și se calculează media generală T a tuturor răspunsurilor, întocmindu-se un tabel al rezultatelor încercărilor (tabelul 6.23).

Tabelul 6.23

Nr. înc.	Factori controlați							Valori măsurate					
	A	B	Int. AB	C	D	E	F	nr.1	nr.2	nr.3	nr.4	nr.5	Media
1	1	1	1	1	1	1	1	1,027	0,895	0,977	0,944	0,867	0,942
2	1	1	1	2	2	2	2	1,498	1,32	1,242	1,52	1,591	1,434
3	1	2	2	1	1	2	2	0,496	0,712	0,525	0,725	0,714	0,634
4	1	2	2	2	2	1	1	1,415	1,189	1,145	1,337	1,379	1,293
5	2	1	2	1	2	1	2	1,275	1,282	1,354	1,175	1,305	1,278
6	2	1	2	2	1	2	1	1,092	0,982	0,969	1,092	0,928	1,013
7	2	2	1	1	2	2	1	1,104	0,987	0,978	1,054	1,058	1,036
8	2	2	1	2	1	1	2	1,175	1,179	1,165	1,164	1,151	1,167
Media generală a răspunsurilor													1,1

e. se calculează răspunsul mediu pentru fiecare nivel al fiecărui factor, corespunzător mediei rezultatelor tuturor încercărilor în care factorul se găsește la acel nivel. De exemplu:

$$\bar{A}_1 = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \bar{x}_4}{4}, \tag{6.12}$$

$$\bar{A}_2 = \frac{\bar{x}_5 + \bar{x}_6 + \bar{x}_7 + \bar{x}_8}{4} \tag{6.13}$$

Media generală \bar{T} corespunde valorii centrale a răspunsurilor medii pentru nivelurile fiecărui factor:

$$\frac{\bar{A}_1 + \bar{A}_2}{2} = \bar{T}. \tag{6.14}$$

f. se calculează efectul mediu al fiecărui nivel al factorilor

g. similar se calculează efectul mediu al interacțiunii AB și se întocmește un tabel cu răspunsuri (tabelul 6.24):

$$E_{A1} = \bar{A}_1 - \bar{T}; E_{A2} = \bar{A}_2 - \bar{T}; E_{A1} = -E_{A2}. \tag{6.15}$$

Tabelul 6.24

Nr. factor	Efect asupra valorii măsurate			
	Nivel 1		Nivel 2	
A	E_{A1}	-0,024	E_{A2}	0,024
B	E_{B1}	0,067	E_{B2}	-0,067
AB	$E_{(AB)1}$	0,045	$E_{(AB)2}$	-0,045
C	E_{C1}	-0,127	E_{C2}	0,127
D	E_{D1}	-0,161	E_{D2}	0,161
E	E_{E1}	0,070	E_{E2}	-0,070
F	E_{F1}	-0,029	E_{F2}	0,029

h. se reprezintă grafic valorile din tabelul cu răspunsuri

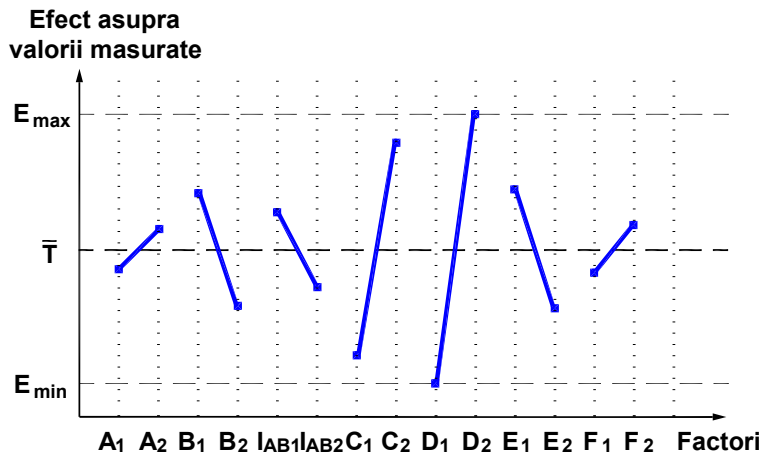


Fig. 6.64 Grafic cu răspunsuri

Pentru detalierea efectului interacțiunii AB asupra valorii măsurate se analizează valorile relative ale diferitelor combinații posibile și anume A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 , A_2B_2 .

- se calculează răspunsul mediu pentru fiecare combinație posibilă:

$$\bar{A}_1\bar{B}_1 = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{2}; \bar{A}_1\bar{B}_2 = \frac{\bar{x}_3 + \bar{x}_4}{2}; \bar{A}_2\bar{B}_1 = \frac{\bar{x}_5 + \bar{x}_6}{2}; \bar{A}_2\bar{B}_2 = \frac{\bar{x}_7 + \bar{x}_8}{2} \quad (6.16)$$

$$\bar{A}_1\bar{B}_1 = 1,188; \bar{A}_1\bar{B}_2 = 0,964; \bar{A}_2\bar{B}_1 = 1,145; \bar{A}_2\bar{B}_2 = 1,102$$

- efectul mediu al interacțiunii $E_{A_1B_1}$ cuprinde efectele proprii nivelurilor A_1 și B_1 precum și valoarea interacțiunii $I_{A_1B_1}$ dacă aceasta există:

$$E_{A_1B_1} = E_{A_1} + E_{B_1} + I_{A_1B_1} \quad (6.17)$$

dar rezultă:

$$E_{A_1B_1} = \bar{A}_1\bar{B}_1 - \bar{T} = (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + I_{A_1B_1} \quad (6.18)$$

de unde reiese valoarea interacțiunii $I_{A_1B_1}$:

$$I_{A_1B_1} = \bar{A}_1\bar{B}_1 - \bar{T} - (E_{A_1} + E_{B_1}) \quad (6.19)$$

$$I_{A_1B_1} = 0,045; I_{A_1B_2} = -0,045; I_{A_2B_1} = -0,045; I_{A_2B_2} = 0,045$$

- i. se modifică modul de prezentare a matricii de experiențe pentru a calcula direct cele 4 valori posibile ale interacțiunii AB, înlocuind cifrele din coloana 3 rezervată interacțiunii cu valorile 1, 2, 3, 4 corespunzătoare celor 4 combinații posibile prezentate anterior. Matricea L8 cu explicitarea interacțiunii AB se prezintă în tabelul 6.25.

Tabelul 6.25

Nr. încercare	Factori controlați						
	A	B	AB	C	D	E	F
1	1	1	A_1B_1	1	1	1	1
2	1	1	A_1B_1	2	2	2	2
3	1	2	A_1B_2	1	2	2	1
4	1	2	A_1B_2	2	1	1	2
5	2	1	A_2B_1	1	1	2	2
6	2	1	A_2B_1	2	2	1	1
7	2	2	A_2B_2	1	2	1	2
8	2	2	A_2B_2	2	1	2	1

- j. se determină nivelurile factorilor astfel încât să se optimizeze criteriul țintă ținând cont de următoarele aspecte:

- se determină factorii care au cea mai mare influență asupra criteriului țintă (R_a) și se aleg nivelurile corespunzătoare ale acestora
- se aleg factorii neinfluenți după criterii economice
- în ipoteza că toți factorii sunt reglați la nivelurile optime efectele lor medii individuale se adună
- se estimează valoarea R_a teoretic utilizând numai efectele majore ale factorilor și interacțiunilor (se procedează astfel întrucât eroarea experimentală fiind repartizată în cadrul fiecărei medii calculate ar exista posibilitatea unei supraestimări):

$$R_a \text{ teoretic} = \bar{T} + \sum(E) + \sum(I) \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned} R_a \text{ teoretic} &= \bar{T} + E_{A_1} + E_{B_2} + E_{C_1} + E_{D_2} + E_{E_2} + E_{F_1} + E_{I_{AB2}} \\ &= 1,1 + (-0,024) + (-0,067) + (-0,127) + (0,161) + (-0,070) + (-0,029) + (-0,045) = \\ &= 0,899 \end{aligned}$$

Pentru a calcula valoarea teoretică rezultantă a rugozității, din momentul în care toți factorii sunt reglați la nivelurile optime, efectele lor se adună.

Nivelurile optime ale parametrilor de prelucrare rezultate în urma optimizării cu planurile de experiențe clasice, pentru a atinge valoarea țintă a rugozității, sunt:

A₁ B₂ C₁ D₂ E₂ F₁

6.4.6 Planuri de experiențe Taguchi

Metoda planurilor de experiențe Taguchi este o aplicație particulară a planurilor de experiențe clasice. Planurile de experiențe Taguchi tratează în mod unitar media și variabilitatea caracteristicilor măsurate (dispersia).

Prin utilizarea raportului S/N se poate găsi în primă instanță o combinație a nivelurilor semnalelor de intrare (factori controlabili) care se dovedesc cei mai insensibili la factorii zgomot.

Exprimarea raportului S/N în dB independent de natura caracteristicilor măsurate permite compararea performanțelor mai multor caracteristici care se optimizează simultan. În figura 6.65 sunt redate etapele succesive ale metodei planurilor de experiențe Taguchi.

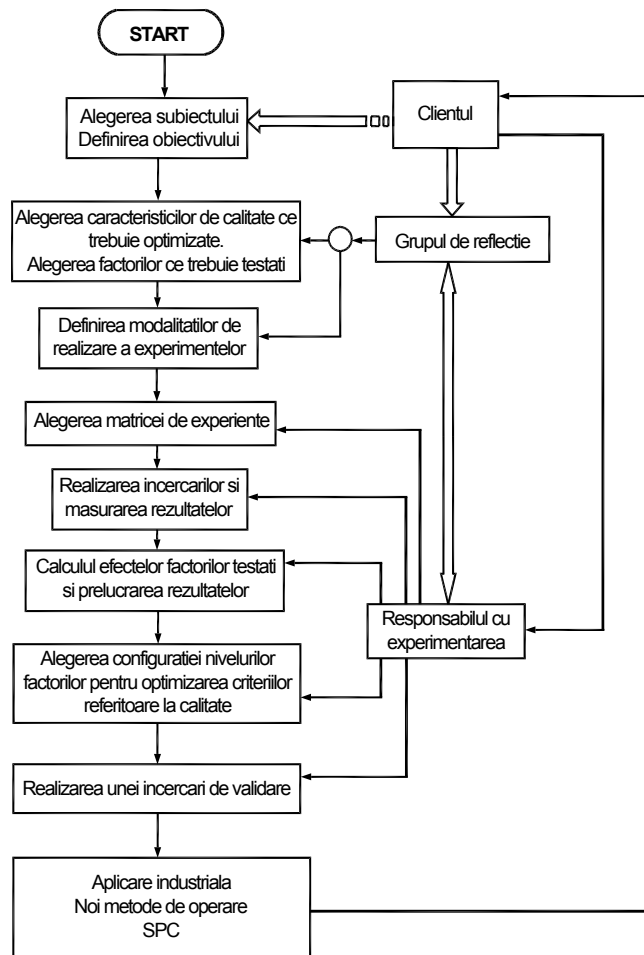


Fig. 6.65 Etapele de realizare a unui plan de experiențe Taguchi

Pentru realizarea și aplicarea corectă și completă a unui plan de experiențe Taguchi trebuie respectate în principiu următoarele 7 puncte cheie:

1. Se efectuează investigații prealabile asupra problemei puse de client pentru a se justifica necesitatea utilizării planurilor de experiențe Taguchi
2. Grupul de reflecție trebuie astfel constituit încât să cuprindă toate persoanele calificate care cunosc problema de investigat
3. Caracteristicile de optimizat trebuie să fie în strânsă legătură cu energia din sistemul studiat
4. Factorii studiați trebuie să fie selecționați funcție de impactul lor asupra energiei utilizate în sistemul studiat. Nivelurile factorilor trebuie alese cât mai depărtate în vederea obținerii de efecte cât mai bine diferențiate
5. Studiarea factorilor aduce mai multă informație decât studiarea interacțiunilor. Se studiază în primă fază 2 până la 4 factori considerați mai influenți și, dacă este cazul, și interacțiunile dintre ei. Dacă este necesar se studiază aceste interacțiuni cu un experiment suplimentar de afinare a rezultatelor
6. Toate modalitățile de realizare a încercărilor și măsurarea rezultatelor trebuie înregistrate în documente oficiale
7. Încercarea de validare este obligatorie pentru confirmarea experimentelor.

Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe Taguchi presupune următoarele etape:

- a. se consideră un criteriu de calitate de optimizat de tip țintă g și se aplică etapele a)...i) de la analiza clasică
- b. se calculează abaterea standard a fiecărei serii de măsurări s_1, s_2, \dots, s_8

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (6.21)$$

- c. se calculează raportul S/N pentru fiecare serie de măsurări și se calculează media răspunsurilor S/N, \bar{S}/N

Mijloacele pentru evaluarea performanței unui sistem au un rol critic mai ales atunci când se încearcă optimizarea rapidă a unui produs sau proces nou, făcută și în scopul reducerii costurilor asociate ciclului de dezvoltare a produsului sau procesului. Dacă se folosește metoda tradițională de evaluare a performanței, adică parcurgerea unei liste detaliate a problemelor specifice (check-list), atunci se poate obține, eventual, o îmbunătățire punctuală a produsului sau procesului, îmbunătățirea globală a calității acestora fiind incertă.

Având în vedere aceste lucruri este esențial să se dezvolte o metrologie specifică și sintetică care să permită evaluarea performanței într-o manieră eficientă. Se consideră că performanța reprezintă ieșirea unui sistem cu una sau mai multe intrări. Atunci când se dorește evaluarea performanțelor unui sistem, trebuie considerate pe rând atât ieșirile dorite (cele dorite a fi obținute) cât și ieșirile nedorite (cele de evitat).

Primele vor fi apelate în calitate de semnale iar celelalte în calitate de zgomote, prin analogie cu folosirea tradițională a celor două noțiuni din expresia raportul semnal/zgomot (S/N) utilizat în domeniul comunicațiilor electronice și optoelectronice. Spre deosebire de abordările clasice (tradiționale) care tratează separat aceste două componente, Taguchi utilizează pentru a evalua calitatea unui produs sau proces, o măsură sintetică a performanței cu aceeași denumire (raport semnal/zgomot), care ia în calcul simultan atât media cât și dispersia.

Într-adevăr având în vedere faptul că scopul unui experiment este fixarea anumitor valori pentru parametrii de intrare în sistem (intrările), ai unui produs sau

proces, astfel încât acesta să atingă performanțele dorite (ieșirile dorite) și în plus să aibă o sensibilitate minimă la factorii necontrolabili (zgomote), adică ieșirile nedorite, atunci este logic ca cele două componente (media și dispersia) să fie optimizate împreună.

Având în vedere că obiectivul general a fost stabilit, măsura sintetică a performanței sistemului, adică indicatorul de performanță raport semnal/zgomot are și următoarele caracteristici:

- dacă mai mulți factori au fiecare în mod individual un efect asupra performanței, atunci este de dorit ca efectul combinat al acestora să fie suma efectelor individuale (proprietate numită și aditivitate)
- maximizarea indicelui de performanță corespunde minimizării funcției pierdere a calității în sensul dat de Taguchi
- indicele de performanță este independent de nivelul fixat al performanței propriu-zise.

Există sisteme la care în mod frecvent caracteristica de ieșire trebuie să îndeplinească un obiectiv de tipul *optimumul este valoarea nominală* sau se folosește expresia caracteristica de calitate este un *criteriu țintă*. Ambele exprimări, criteriu țintă sau valoare nominală, reprezintă de fapt un mod de a defini o valoare nominală preferențială pentru ieșirea unui sistem care urmează a fi optimizat. Toate celelalte valori sunt mai puțin dorite decât valoarea țintă.

Se efectuează o serie de măsurări la care se poate determina media, respectiv s-a stabilit intervalul de variație a performanței. Numai pe baza acestor informații este greu să se facă aprecieri asupra performanței, neavând totodată informații asupra unității de măsură a performanței și nici un punct de referință pentru stabilirea ordinului de mărime al acesteia. Apare sugestia de a folosi pe post de indice de performanță, rezultatul împărțirii valorii medii la intervalul de variație.

Avantajele unui astfel de indice de performanță (care respectă și caracteristicile impuse de Taguchi) sunt:

- prin împărțire (raport) este eliminată problema unității de măsură
- raportul include o referință privind ordinul de mărime care va permite relativizarea valorii intervalului de variație
- acest mod de definire a indicelui de performanță îl fac independent de modificările ulterioare ale nivelului performanței propriu-zise.

Pentru un criteriu țintă raportul semnal/zgomot bazat pe raportul medie/interval de variație (abatere standard) este un indice de performanță care rămâne constant în timpul ajustării mediei la valoarea țintă.

Expresia raportului semnal/zgomot pentru criteriile țintă este dată în relația (6.22). Se menționează că pentru îmbunătățirea aditivității se utilizează logaritmul raportului și prin analogie cu convenția din electronică și acustică, raportul se exprimă în decibeli, respectiv formula se ajustează cu raportul 1/n pentru păstrarea rigurozității matematice atunci când numărul de măsurări este relativ mic.

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left[\frac{\bar{y}^2}{s^2} - \frac{1}{n} \right] \quad [\text{dB}]. \quad (6.22)$$

Cu cât valoarea algebrică a raportului S/N este mai mare cu atât performanța produsului sau procesului ce trebuie optimizat va fi mai bună (evident pierderea generată va fi mai mică).

Raportul S/N permite relativizarea valorii abaterii standard în raport cu valoarea medie, eliminând totodată problema unității de măsură.

În cazul în care toate valorile măsurate sunt egale adică $s = 0$, atunci calculul direct al raportului S/N nu este posibil. Totuși pentru a putea evalua

performanța prin calcularea raportului S/N, se alocă abaterii standard o valoare foarte mică.

În cazul în care caracteristicile de performanță iau valori pozitive și negative, există posibilitatea ca valoarea medie să devină algebric inferioară abaterii standard și atunci intervalul de variație se măsoară utilizând varianța s^2 . Pentru calculul raportului S/N se folosește relația (6.23) în care semnul " - " indică faptul că valoarea algebrică a lui S/N va fi cu atât mai mare cu cât varianța s^2 este mai mică.

Criteriile de performanță asimilate criteriilor țintă sunt de fapt un caz particular al criteriilor dinamice.

$$\frac{S}{N} = -10 \log s^2 \quad [\text{dB}]. \quad (6.23)$$

d. se întocmește un tabel cu răspunsuri și parametri calculați anterior. Rezultatele încercărilor, mediile, abaterile standard, rapoartele S/N, tabelul 6.26

Tabelul 6.26

Nr Înc	Factori controlați							Valori măsurate							
	A	B	AB	C	D	E	F	nr.1	nr.2	nr.3	nr.4	nr.5	Media	Ab. Std	S/N [dB]
1	1	1	1	1	1	1	1	1,027	0,895	0,977	0,944	0,867	0,942	0,064	23,353
2	1	1	1	2	2	2	2	1,498	1,32	1,242	1,52	1,591	1,434	0,147	19,775
3	1	2	2	1	1	2	2	0,496	0,712	0,525	0,725	0,714	0,634	0,114	14,876
4	1	2	2	2	2	1	1	1,415	1,189	1,145	1,337	1,379	1,293	0,119	20,714
5	2	1	2	1	2	1	2	1,275	1,282	1,354	1,175	1,305	1,278	0,065	25,870
6	2	1	2	2	1	2	1	1,092	0,982	0,969	1,092	0,928	1,013	0,075	22,606
7	2	2	1	1	2	2	1	1,104	0,987	0,978	1,054	1,058	1,036	0,053	25,819
8	2	2	1	2	1	1	2	1,175	1,179	1,165	1,164	1,151	1,167	0,011	40,513
Media generală a răspunsurilor													1,1		24,191

e. se calculează răspunsul S/N mediu pentru fiecare nivel al fiecărui factor, corespunzător mediei raporturilor S/N ale tuturor încercărilor în care factorul se găsește la acel nivel. Similar, se calculează răspunsul S/N mediu relativ la interacțiuni, de exemplu:

$$\bar{A}_{1,S/N} = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_2 + (S/N)_3 + (S/N)_4}{4}, \quad (6.24)$$

$$\bar{A}_{1,S/N} \bar{B}_{1,S/N} = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_2}{2}. \quad (6.25)$$

f. se calculează efectul mediu S/N al fiecărui nivel al factorilor în raport cu media răspunsurilor S/N. Se calculează valoarea interacțiunilor. De exemplu:

$$E_{A1,S/N} = \bar{A}_{1,S/N} - \bar{T}_{S/N}, \quad (6.26)$$

$$I_{A1B1,S/N} = \bar{A}_{1,S/N} \bar{B}_{1,S/N} - \bar{T}_{S/N} - (E_{A1,S/N} + E_{B1,S/N}). \quad (6.27)$$

g. se întocmesc tabele cu răspunsuri pentru factori și interacțiuni (tabelul 6.27, tabelul 6.28):

Tabelul 6.27

Efect asupra raportului S/N		Nr. factor	Efect asupra valorii măsurate	
Nivel 1	Nivel 2		Nivel 1	Nivel 2
-4,504	4,504	A	-0,024	0,024
-1,305	1,305	B	0,067	-0,067
-1,715	1,715	C	-0,127	0,127
1,164	-1,164	D	-0,161	0,161
3,417	-3,417	E	0,070	-0,070
-1,075	1,075	F	-0,029	0,029

Tabelul 6.28

Interacțiune	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂
Efect asupra raportului S/N	3,200	-3,200	-3,200	3,200
Efect asupra valorii măsurate	0,045	-0,045	-0,045	0,045

h. se reprezintă grafic valorile din tabelul cu răspunsuri S/N (fig. 6.66)

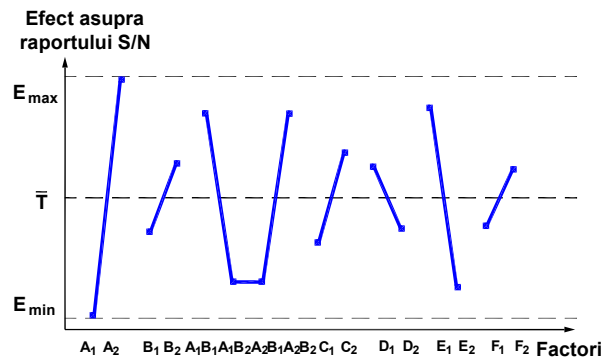


Fig. 6.66 Graficul cu răspunsuri pentru raportul S/N

- i. se determină nivelurile factorilor ținând cont de următoarele aspecte:
- se determină factorii care au cea mai mare influență asupra raportului S/N și se aleg nivelurile corespunzătoare astfel încât valoarea algebrică a raportului S/N să fie cât mai mare.
 - se aleg factorii neinfluenți după criterii economice
 - în ipoteza că toți factorii sunt reglați la nivelurile optime efectele lor medii S/N individuale se adună
 - se estimează valoarea $\hat{\mu}$ a raportului S/N utilizând numai efectele majore ale factorilor și interacțiunilor (se procedează astfel întrucât eroarea experimentală fiind repartizată în cadrul fiecărei medii calculate ar exista posibilitatea unei supraestimări):

$$\hat{\mu} = \bar{T}_{S/N} + \sum (E_{S/N}) + \sum (I_{S/N}) = 34,991 \text{ db} \quad (6.28)$$

- se estimează valoarea criteriului țintă R_a :

$$R_a \text{ teoretic} = \bar{T} + \sum (E) + \sum (I) \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} &= \bar{T} + E_{A2} + E_{B2} + E_{C1} + E_{D1} + E_{E1} + E_{F1} + E_{IA1B1} = \\ &= 1,1 + (0,024) + (-0,067) + (-0,127) + (-0,161) + (0,07) + (-0,029) + (0,045) = \\ &= 0,855 \end{aligned}$$

Nivelurile optime ale parametrilor de prelucrare rezultate în urma optimizării cu planurile de experiențe Taguchi sunt:

A₂ B₂ C₁ D₁ E₁ F₁

6.4.7 Planuri de experiențe Taguchi cu valoare țintă (Qualitek)

Optimizarea parametrilor de proces utilizând programul Qualitek începe prin introducerea în acesta a datelor de intrare (figura 6.67).

Array Type: **L-8**

Use <ctrl> + <arrows> to move cursor

	Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
1	viteza	3000 mm/m	4500 mm/min	-----	-----
2	puterea	170 W	180 W	-----	-----
3	INTER COLS 1 x 2	*INTER*	-----	-----	-----
4	tiimpul de impuls	5 ms	3 ms	-----	-----
5	tiimpul de repaus	3 ms	5 ms	-----	-----
6	duza / distanta d	d4mm / 5m	d4mm / 2.5 mm	-----	-----
7	debitul de gaz	20 l/min	10 l/min	-----	-----

Col Inter Inter Table Reset Col Delete Cell Unused Upgrade Dummy Data

Fig. 6.67 Nivelurile factorilor controlați

Prin utilizarea planurilor de experiențe factoriale fracționate s-a redus considerabil numărul de încercări care trebuie efectuate (8 încercări).

Fiecare încercare este efectuată cu o combinație diferită a nivelurilor factorilor și fiecare nivel al fiecărui factor este combinat cu fiecare nivel al altor factori, de un număr egal de ori.

Configurația experimentului este redată în figura 6.68

Review Control Factors

	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1.027	.895	.977	.944
2	1	1	1	2	2	2	2	1.498	1.32	1.242	1.52
3	1	2	2	1	1	2	2	.496	.712	.525	.725
4	1	2	2	2	2	1	1	1.415	1.189	1.145	1.337
5	2	1	2	1	2	1	2	1.275	1.282	1.354	1.175
6	2	1	2	2	1	2	1	1.092	.982	.969	1.092
7	2	2	1	1	2	2	1	1.104	.987	.978	1.054
8	2	2	1	2	1	1	2	1.175	1.179	1.165	1.164

Inner Array Results

Qualitek-4 starts with PISTON D4W example experiment. Since this experiment is already designed and has results, you may proceed with ANALYSIS and check the capabilities available for analyzing results. To design your own experiment click on Design Menu and select the desired option. For best viewing, set screen resolution to 800x600.

Fig. 6.68 Configurația experimentului

În figura 6.69 este prezentată o captură de ecran dintr-o secvență a programului Qualitek, pe care pot fi vizualizate valorile R_a pentru toate cele opt combinații de factori (notate cu Trial#), aplicate pe câte cinci piese (notate cu Sample #). Pe ultima coloană a tabelului se pot citi valorile parametrului S/N care este calculat în acest caz bazat pe MSD (Standard Definition with known target). În câmpul ferestrei se observă tipul de date calculate (S/N Ratio) și criteriul de calitate impus (Nominal is the best), precum și valoarea țintă a acestuia (0.8).

Dacă se calculează rapoartele S/N bazate pe MSD (fig. 6.70), conform relației

$$\frac{S}{N} = -10 \log(\text{MSD}), \quad (6.30)$$

$$\text{unde: MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_N)^2 \quad (6.31)$$

n - numărul de rezultate

y_i - rezultatele măsurărilor

y_N - valoarea țintă (nominală),

rezultă o combinație a factorilor și interacțiunilor care oferă condițiile optime și de performanță.

Conditions	Sample# 1	Sample# 2	Sample# 3	Sample# 4	Sample# 5	Sample# 6	S/N Ratio
Trial# 1	1.027	0.895	0.977	0.944	0.867		16.303
Trial# 2	1.498	1.32	1.242	1.52	1.591		3.773
Trial# 3	0.496	0.712	0.525	0.725	0.714		14.229
Trial# 4	1.415	1.189	1.145	1.337	1.379		5.944
Trial# 5	1.275	1.282	1.354	1.175	1.305		6.343
Trial# 6	1.092	0.982	0.969	1.092	0.928		13.034
Trial# 7	1.104	0.987	0.978	1.054	1.058		12.363
Trial# 8	1.175	1.179	1.165	1.164	1.151		8.708
							10.087

(All results: Avg. = 1.099, StDev. = .25)
Use <ctrl> + <arrows> to move cursor.

Fig. 6.69 Valorile rapoartelor S/N și media acestora pentru cele 5 serii de date

Urmează calculul răspunsului mediu pentru fiecare nivel al fiecărui factor, corespunzător mediei rezultatelor tuturor încercărilor în care factorul se găsește la acel nivel.

$$\bar{A}_{1,S/N} = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_2 + (S/N)_3 + (S/N)_4}{4} \quad (6.32)$$

$$\bar{A}_{2,S/N} = \frac{(S/N)_4 + (S/N)_5 + (S/N)_6 + (S/N)_7}{4} \quad (6.33)$$

Efectele medii ale fiecărui factor și a interacțiunii testate sunt prezentate în figura 6.70.

Expt. File: LASER2.Q4W Data Type: S/N Ratio
 QC Type: Nominal is the Best

Column # / Factors	Level 1	Level 2	L2 - L1
1 viteza	10.062	10.112	.05
2 puterea	9.863	10.311	.448
3 INTER COLS 1 x 2	10.287	9.887	-.401
4 timpul de impuls	12.31	7.865	-4.446
5 timpul de repaus	13.069	7.106	-5.964
6 duza / distanta d	9.324	10.85	1.525
7 debitul de gaz	11.911	8.263	-3.648

Fig. 6.70 Efectele medii ale factorilor și interacțiunilor

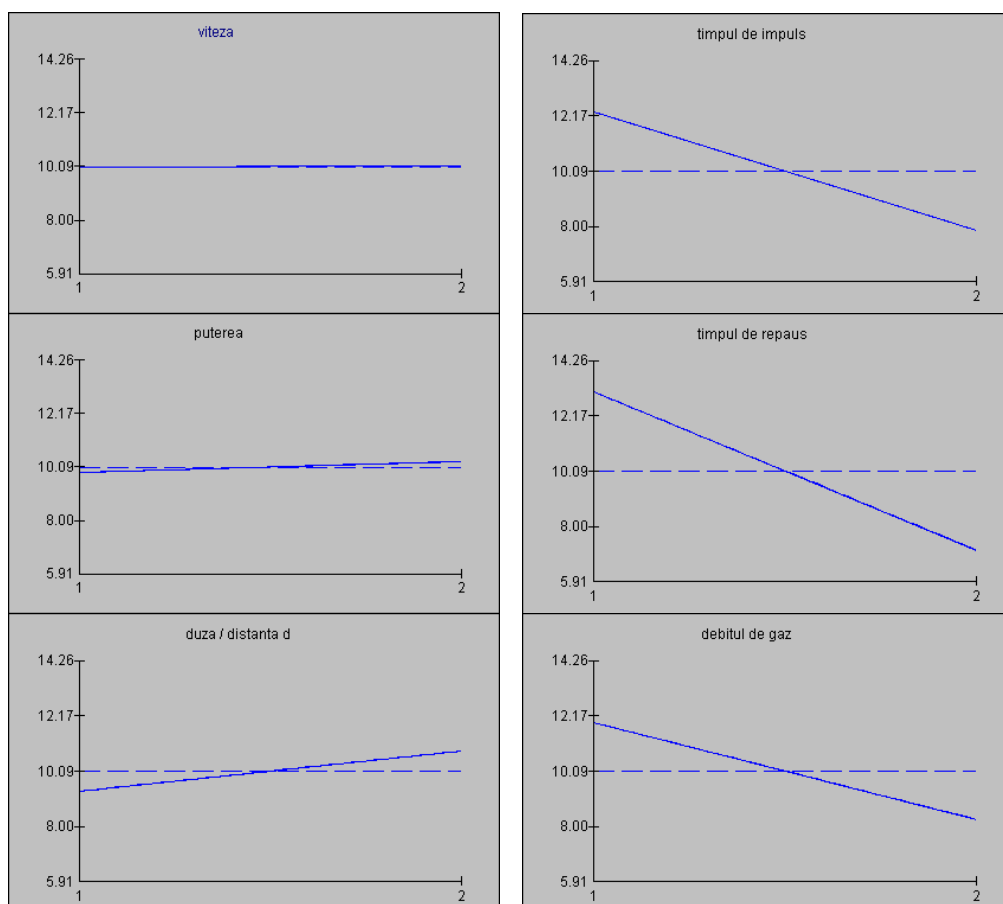


Fig. 6.71 Efectele principale ale factorilor

Media generală, \bar{T} , corespunde valorii centrale a răspunsurilor medii pentru nivelurile fiecărui factor:

$$\frac{\bar{A}_1 + \bar{A}_2}{2} = \bar{T}. \quad (6.34)$$

Se calculează efectul mediu al fiecărui nivel al factorilor. Similar se calculează efectul mediu al interacțiunii AB.

Graficele efectelor factorilor pentru nivelul 1 și 2 sunt redată în figura 6.71.

Number of interactions between two factors calculated = 15

#	Interacting Factor Pairs (Order based on SI)	Columns	SI(%)	Col	Opt.
1	puterea x duza / distanta d	2 x 6	74.44	4	[2,2]
2	viteza x duza / distanta d	1 x 6	70.51	7	[2,2]
3	puterea x debitul de gaz	2 x 7	62.04	5	[1,1]
4	viteza x timpul de impuls	1 x 4	57.29	5	[1,1]
5	viteza x puterea	1 x 2	47.15	3	[2,2]
6	viteza x timpul de repaus	1 x 5	42.7	4	[1,1]
7	puterea x timpul de repaus	2 x 5	37.95	7	[1,1]
8	viteza x debitul de gaz	1 x 7	29.48	6	[2,1]
9	puterea x timpul de impuls	2 x 4	25.55	6	[2,1]
10	timpul de impuls x duza / distanta d	4 x 6	7.49	2	[1,2]
11	timpul de repaus x duza / distanta d	5 x 6	5.33	3	[1,2]

Explanation of Columns of Table

Columns - Represent the column locations to which the interacting factors are assigned.

SI - Interaction severity index (100% for 90 degrees angle between the lines, 0% for parallel lines).

Col - Shows column that should be reserved if this interaction effect were to be studied (2-L factors only)

Opt - Indicates factor levels desirable for the optimum condition (based strictly on the first 2 levels).
If an interaction is included in the study and found significant (in ANOVA), the indicated levels must replace the factor levels identified for the optimum condition.

Fig. 6.72 Testul pentru prezența interacțiunilor

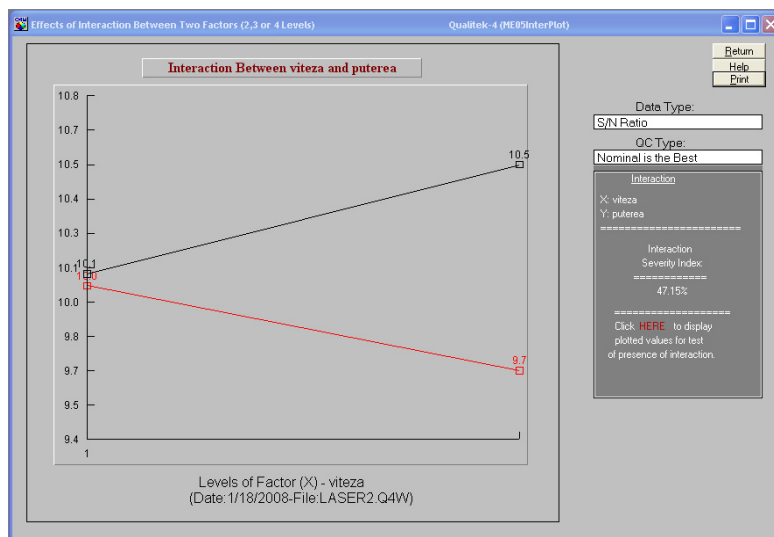


Fig. 6.73 Interacțiunea între viteză și putere

Din figurile 6.70 și 6.71 rezultă că factorii cu cea mai mare influență asupra procesului, pentru criteriul considerat sunt timpul de repaus, timpul de impuls și debitul de gaz. Aceștia, de fapt, controlează în cea mai mare măsură regimul termic la nivelul zonei iradiate. Următorul factor de influență este defocusarea, care determină distribuția puterii pe suprafața spotului activ.

În afară de interacțiunea considerată în planul de experiențe, au fost studiate și interacțiunile dintre toți factorii de proces (figura 6.72).

Din coloana SI%, care indică severitatea interacțiunii, rezultă că puterea, respectiv viteza de deplasare a capului de lucru interacționează puternic cu defocusarea. Ca urmare corelarea corectă a acestora este esențială pentru obținerea unei stări a suprafeței corespunzătoare.

Celelalte interacțiuni au un caracter moderat (de exemplu interacțiunea putere – viteză ilustrată în figura 6.73) sau nesemnificativ (de exemplu timp de impuls – defocusare sau timp de repaus – defocusare).

În esență, analiza de varianță își propune să pună în evidență semnificația diferențelor dintre mediile unor eșantioane, nu pe baza diferenței directe dintre ele, ci pornind de la împrăștierea (varianța) lor. Cu cât mediile supuse comparației sunt mai diferite (au o împrăștiere mai mare), cu atât este mai probabil ca aceasta împrăștiere să fie datorată „efectului” variabilei independente.

Variabilitatea se poate datora existenței unor factori cu influențe sistematice, a unor factori aleatori de fluctuație mai pronunțată și, în final, factori locali, inevitabili, determinând o fluctuație mai mică, definită „ca fluctuație experimentală”. Analiza dispersională își propune separarea „variabilității totale” în: variabilitatea datorată factorilor sistematici, variabilitatea factorilor cu efecte aleatoare, plus o variabilitate „reziduală” (diferența până la variabilitatea totală), care reprezintă de fapt variabilitatea experimentală. Din aceste variabilități se evaluează dispersiile parțiale corespunzătoare diferiților factori, calculându-se semnificația rapoartelor lor prin aplicarea testului F.

Principial datele experimentale se grupează în funcție de diferite criterii și se urmăresc efectele asupra variabilității în funcție de aceste criterii, efecte care se cuantifică în raport cu variabilitatea reziduală.

Analiza datelor cu metoda ANOVA, inclusă în programul Qualitek furnizează rezultate care confirmă observațiile anterioare (fig. 6.74).

Col # / Factor	Dof (F)	Sum of Squares (S)	Variance (V)	P - Ratio (F)	Pure Sum (S)	Percent (%)
1 viteza	1	.004	.004	-----	.004	.003
2 puterea	1	.4	.4	-----	.4	.28
3 INTER COOLS 1 x 2	1	.318	.318	-----	.318	.223
4 timpul de impuls	1	39.512	39.512	-----	39.512	27.704
5 timpul de repaus	1	71.114	71.114	-----	71.114	49.862
6 duza / distanța d	1	4.654	4.654	-----	4.654	3.263
7 debitul de gaz	1	26.614	26.614	-----	26.614	18.661
Other/Error	0					
Total:	7	142.619				100.00%

Fig. 6.74 Tabelul ANOVA

Din reprezentarea grafică a influenței factorilor și interacțiunilor (fig. 6.75) rezultă că factorii cei mai semnificativi care influențează starea suprafețelor prelucrate în ordinea descrescătoare a ponderii lor în procesul de prelucrare sunt timpul de repaus, timpul de impuls, debitul de gaz și poziția duzei (defocusarea).

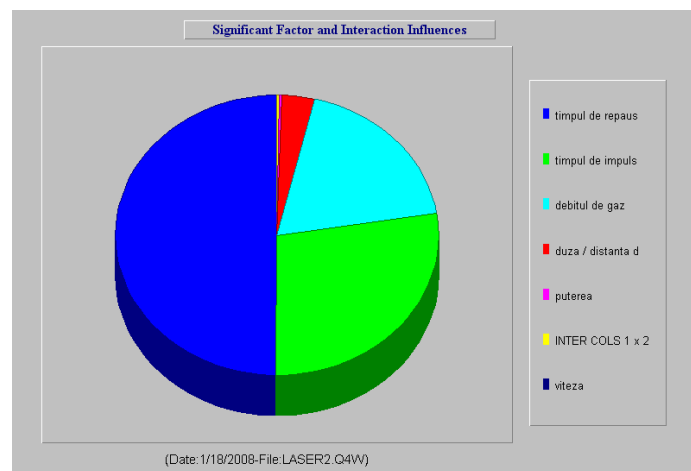


Fig. 6.75 Influența factorilor și a interacțiunii

S-a determinat combinația optimă de factori și interacțiuni pentru obținerea rugozității specificate prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot și prin includerea valorii țintă în formularea raportului S/N (figura 6.76).

Expt. File: LASER2_Q4W Data Type: S/N Ratio
QC Type: Nominal is the Best

Column # / Factor	Level Description	Level	Contribution
1 viteza	4500 mm/min	2	.024
2 puterea	180 W	2	.223
3 INTER COLS 1 x 2	*INTER*	1	.199
4 timpul de impuls	5 ms	1	2.222
5 timpul de repaus	3 ms	1	2.981
6 duza / distanta d	d4mm / 2.5 mm	2	.762
7 debitul de gaz	20 l/min	1	1.823
Total Contribution From All Factors.....			8.233
Current Grand Average Of Performance...			10.087
Expected Result At Optimum Condition...			18.321

Fig. 6.76 Combinația optimă a nivelurilor factorilor și interacțiunilor precum și valoarea așteptată a raportului S/N la condițiile optime

Combinația de factori și interacțiuni din figura 6.76 este considerată cea corectă și se observă că valorile preconizate sunt net îmbunătățite.

Aceleași concluzii rezultă și din graficul performanțelor optime, cu evidențierea cantitativă a influenței factorilor (fig. 6.77).

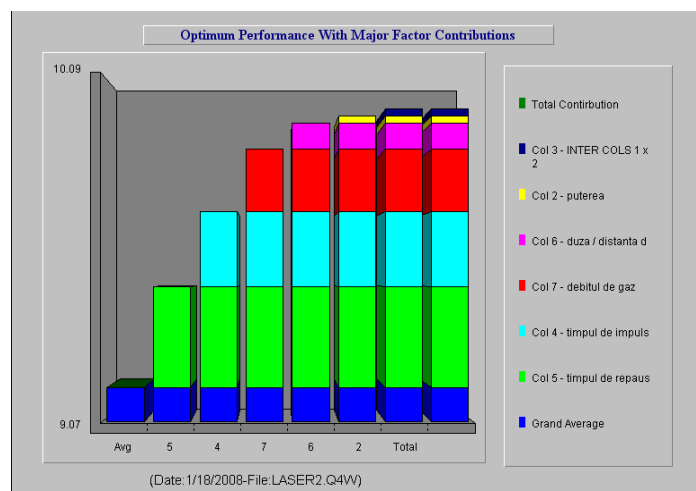


Fig. 6.77 Contribuția factorilor și interacțiunii la performanța optimă

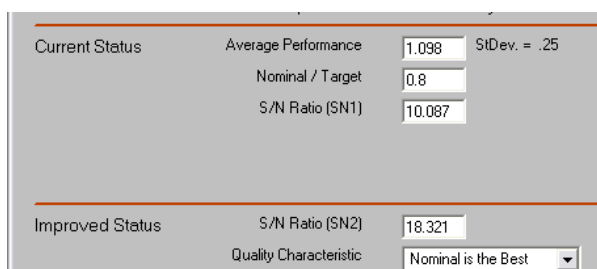


Fig. 6.78 Datele pentru calculul statistic, reducerea variației

În figura 6.78 se observă, într-un tablou rezumativ, datele sintetice caracteristice analizei în curs (media valorilor R_a egală cu 1.098, deviația standard relativă la același indicator egală cu 0.25, raportul S/N=10.087 pentru o valoare nominală – țintă egală cu 0.8) și valoarea estimată a parametrului S/N egală cu 18.321, pentru procesul optimizat, care utilizează combinația numerică de factori indicată în figura 6.76. Se observă faptul că raportul S/N poate fi mult îmbunătățit (aproape dublu pentru procesul optimizat), astfel încât este predictibilă și o creștere substanțială a calității pieselor, pe criteriul formulat.

Caracteristicile optimizatoare cu variație simetrică reprezintă cazul de optimizare definit de Taguchi „Nominal The Best - NTB”, adică „valoarea nominală este cea mai bună”. Dacă valoarea caracteristicii este egală cu valoarea țintă, nivelul de calitate este maxim, iar valoarea funcției pierdere este minimă, respectiv zero.

Orice abatere a caracteristicii față de valoarea țintă determină o pierdere a calității. Astfel, dacă o caracteristică ia valoarea efectivă, diferită de valoarea țintă, rezultă o abatere, (adică o pierdere a calității) și nivelul calității are valoarea mai mică decât valoarea maximă așteptată chiar dacă această valoare efectivă se află în câmpul de toleranță.

Valoarea țintă necesară pentru a optimiza rugozitatea suprafețelor prelucrate cu tehnologie laser este $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

În urma optimizării parametrilor de prelucrare ai laserului cu programul Qualitek care utilizează metoda descrisă anterior și urmărirea valorii țintă pentru

rugozitate, s-a obținut combinația nivelurilor factorilor care fac posibilă reducerea variației în jurul valorii țintă.

În figura 6.79 se prezintă comparativ distribuția rezultatelor înainte de optimizare și distribuția preconizată.

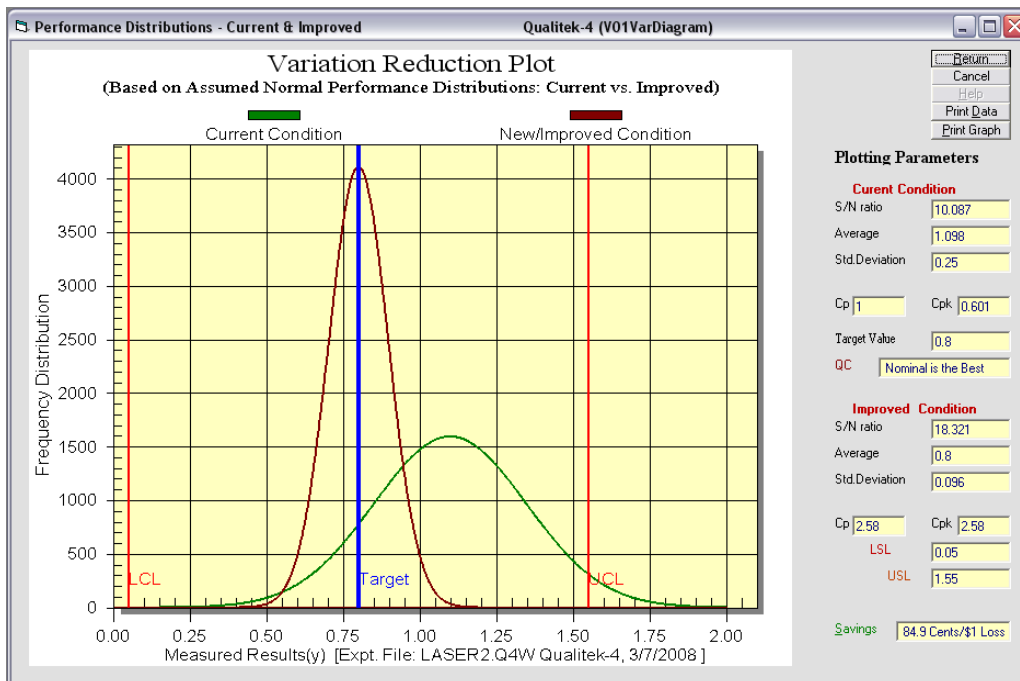


Fig. 6.79 Graficul reducerii variației pe baza ipotezei distribuției normale

Curba trasată cu culoare verde caracterizează statistic lotul de piese măsurat. Se observă ca distribuția de valori ale criteriului nu este simetrică în raport cu valoarea – țintă (trasată sub forma unei verticale albastre). Dispersia, de asemenea, nu are un caracter favorabil, valorile ocupând un segment mai larg decât intervalul $\pm 3\sigma$. În partea dreaptă a ferestrei, sub eticheta „Current Condition” sunt prezentate valorile rezultate din analiza statistica pentru medie, deviație standard și raport S/N.

La valori ale factorilor de influență rezultați prin optimizarea procesului, se estimează o alură a distribuției criteriului centrată în jurul țintei și cu o dispersie mult redusă (curba trasată în culoare brună). Sub eticheta „Improved Conditions” sunt afișate și valorile numerice reprezentative pentru procesul optimizat.

Experimentul de confirmare s-a efectuat utilizând combinația optimă a nivelurilor factorilor și interacțiunii conform programului Qualitek.

Tabelele 6.29 și 6.30 indică valorile de regim ale factorilor de proces optim, respectiv valorile parametrilor de rugozitate ale pieselor prelucrate sub acest regim.

Figurile 6.80...6.84 redau profilogramele acestor piese.

Tabelul 6.29

Nr. Coloană / Factor	Descrierea nivelului	Nivel
1. viteza	4500 mm/min	2
2. puterea	180 W	2
3. interacțiunea 1x2	int 1x2	1
4. timpul de impuls	5 ms	1
5. timpul de repaus	3 ms	1
6. duza / distanța	4 mm / 2,5 mm	2
7. debitul de gaz	20 l/min	1

Tabelul 6.30

Confirmare	R _a	R _q	R _z	R _{zj}	R _{max}	R _p	R _v
1	0,8	0,968	3,433	4,106	1,581	1,852	0,8
2	0,788	0,953	4,044	5,149	2,063	1,982	0,788
3	0,837	1,068	3,97	4,812	1,947	2,022	0,837
4	0,893	1,119	4,3	5,49	2,07	2,229	0,893
5	0,712	0,863	3,368	3,95	1,719	1,649	0,712
Media	0,806	0,9942	3,823	4,7014	1,876	1,9468	0,806

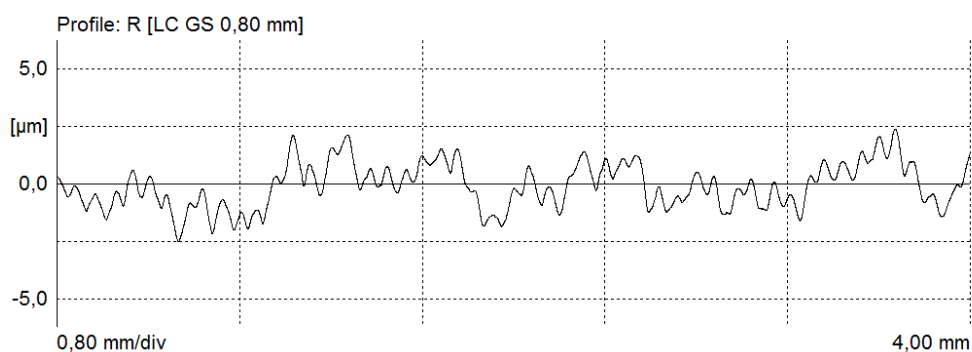


Fig. 6.80 Profilul R pentru combinația de factori optimizați/experimentul 1

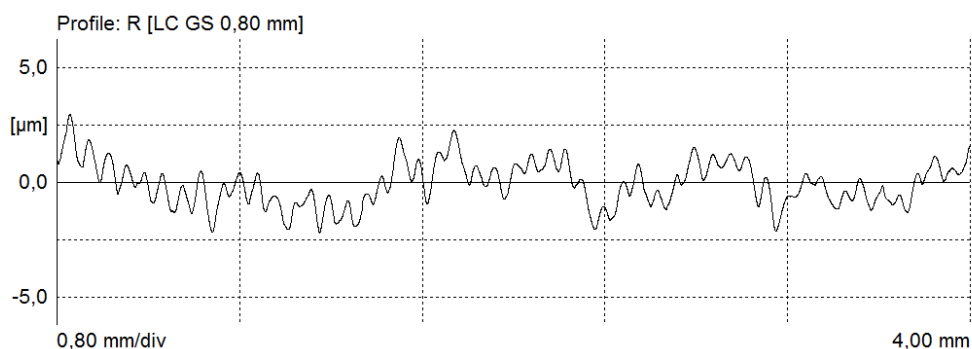


Fig. 6.81 Profilul R pentru combinația de factori optimizați/experimentul 2

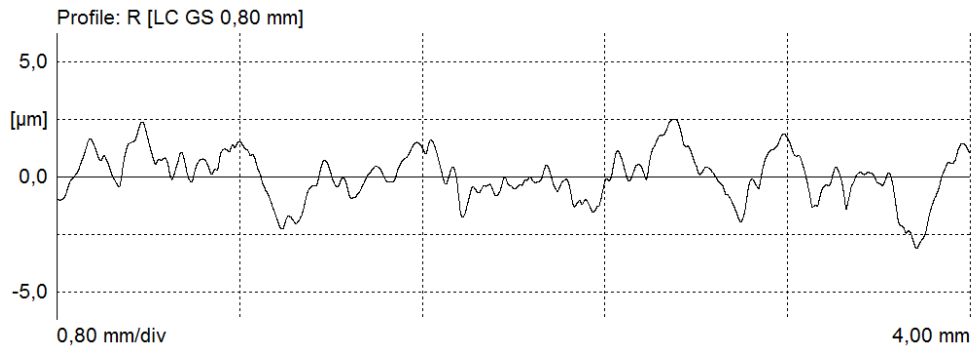


Fig. 6.82 Profilul R pentru combinația de factori optimizați/experimentul 3

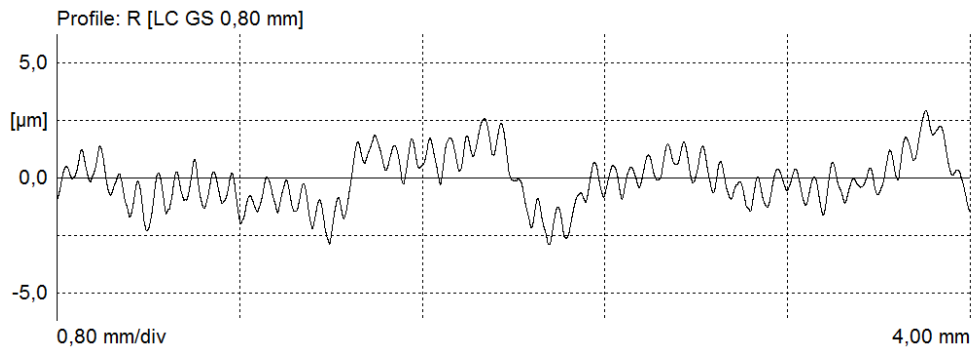


Fig. 6.83 Profilul R pentru combinația de factori optimizați/experimentul 4

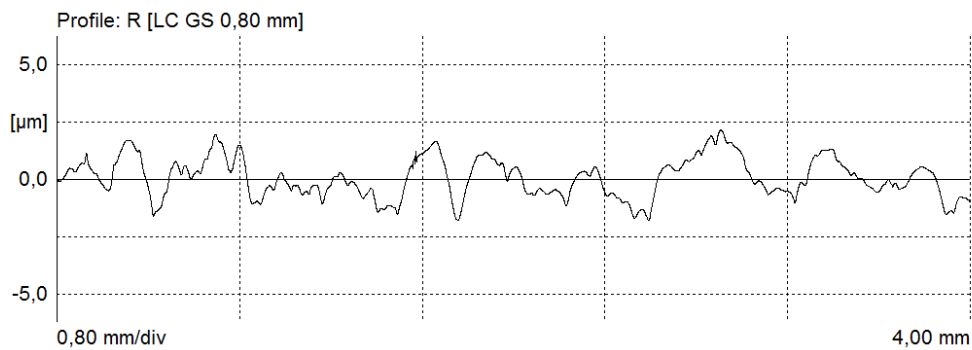


Fig. 6.84 Profilul R pentru combinația de factori optimizați/experimentul 5

Măsurile experimentale s-au făcut pe 7 lungimi de referință standard ($7 \times 0.8=5.6$ mm), iar parametrii de rugozitate au fost determinați după normativele DIN.

O analiză a datelor obținute în urma experimentului de confirmare arată ca raportul S/N obținut este valoric superior ($S/N=24.459$) celui estimat pentru experiment ($S/N=18.321$), așa cum rezultă din figurile 6.85 și 6.86.

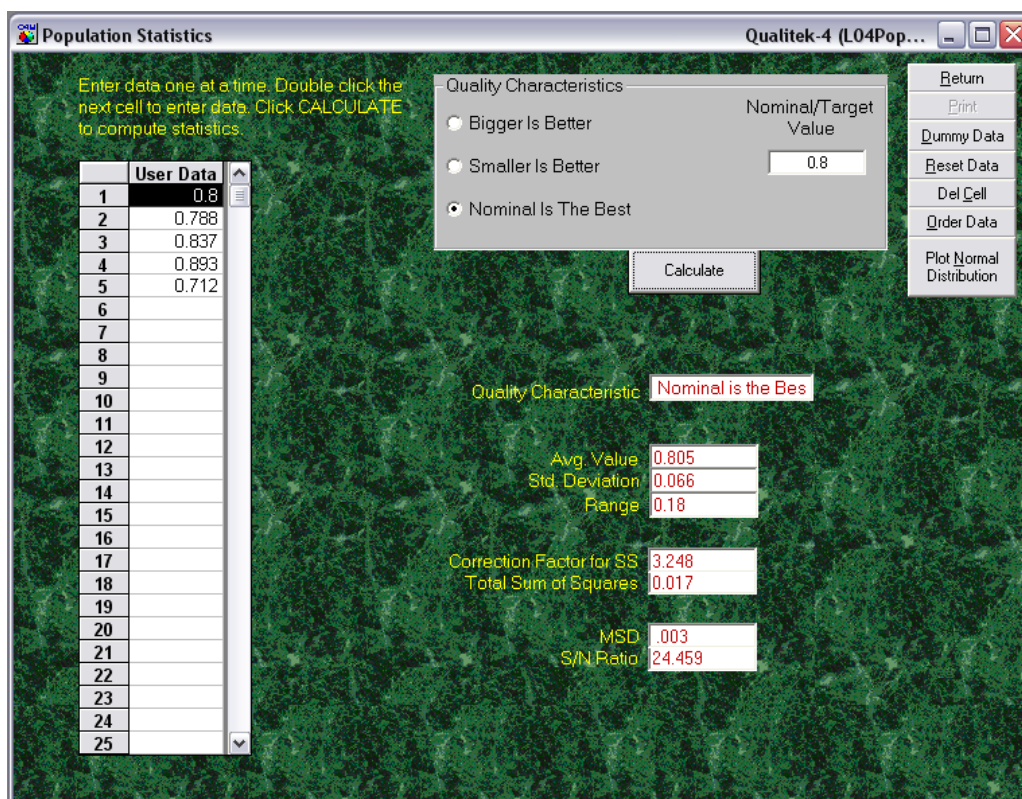


Fig. 6.85 Calculul elementelor statistice și a raportului semnal/zgomot pentru experimentul de confirmare

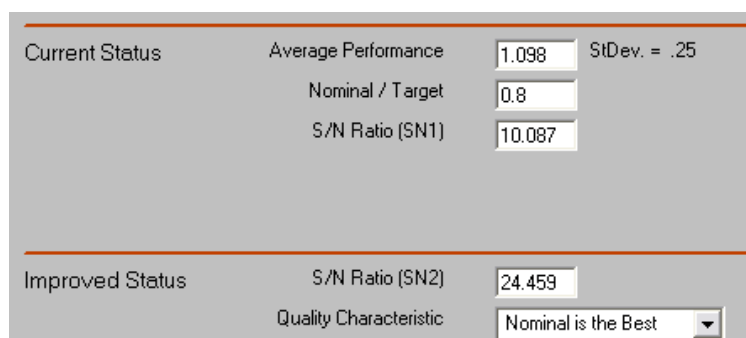


Fig. 6.86 Datele pentru calculul statistic, reducerea variației, pentru experimentul de confirmare

Se observă că valorile obținute în urma experimentului de confirmare sunt net îmbunătățite comparativ cu celor inițiale (înainte de optimizare) - figura 6.87.

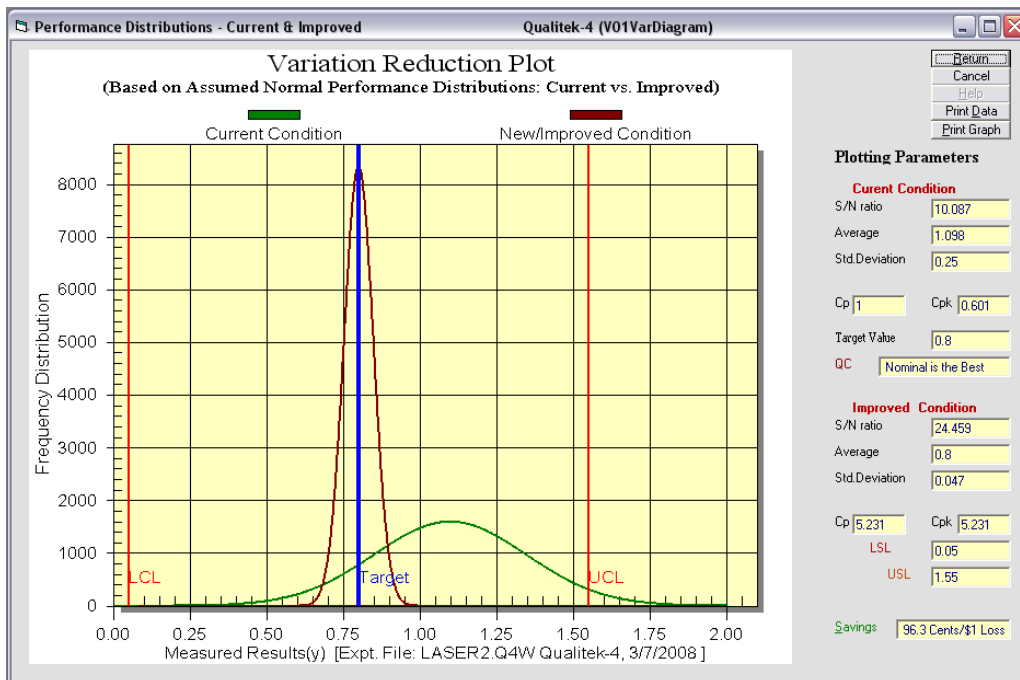


Fig. 6.87 Graficul reducerii variației pe baza ipotezei distribuției normale

Experimentul de confirmare arată o îmbunătățire a raportului S/N față de cel preconizat cât și o reducere a abaterii medii pătratice.

După efectuarea experimentelor s-a previzionat că utilizarea combinației optime de factori și a interacțiunii obținută prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot și prin includerea valorii țintă în formularea raportului S/N, aduce o îmbunătățire a dispersiei valorii rugozității în jurul valorii țintă.

Tabelele 6.31 și 6.32 rezumă numeric rezultatele experimentului de optimizare și respectiv de confirmare a acesteia, punând în evidență succesul operației în sensul asigurării unei creșteri substanțiale a calității pe criteriul impus.

Tabelul 6.31

Experimente inițiale	Condiții curente	Condiții previzionate
Raportul S/N	10,087	18,321
Media	1,098	0.8
Abaterea standard	0.25	0.096
Cp	1	2,58
Cpk	0,601	2,58

Tabelul 6.32

Experiment de confirmare	Condiții curente	Condiții realizate
Raportul S/N	10,087	24,459
Media	1,098	0.805
Abaterea standard	0.25	0,047
Cp	1	5,231
Cpk	0,601	5,231

6.5 Concluzii. Contribuții personale

Capitolul al șaselea descrie un amplu program experimental, care are ca scop creșterea preciziei și eficienței procesului de prelucrare cu fascicul laser, precum și îmbunătățirea calității pieselor, pe criteriul evaluării parametrilor de stare a suprafeței.

Într-o exprimare de maximă generalitate, strategia abordării Taguchi se bazează pe minimizarea impactului factorilor paraziți (factori – zgomot), acționând experimental asupra factorilor controlați prin găsirea combinațiilor de valori ale acestora, astfel încât procesul sau produsul să respecte performanțele funcționale și totodată, să fie robust la factorii – zgomot.

Sunt definite și descrise matricile Taguchi standard, care se dovedesc suficient de largi pentru a satisface marea majoritate a situațiilor care intervin în practica industrială. Caracteristic și sugestiv este modul de simbolizare a matricilor Taguchi standard, care se face funcție de numărul de experimente (numărul de linii ale matricii), numărul de factori și interacțiuni (numărul de coloane ale matricii) respectiv numărul de niveluri.

Metoda planurilor de experiențe Taguchi poate fi privită ca o aplicație particulară a planurilor de experiențe clasice. Planurile de experiențe Taguchi tratează în mod unitar media și variabilitatea caracteristicilor măsurate (dispersia).

Prin utilizarea raportului S/N se poate găsi în primă instanță o combinație a nivelurilor semnalelor de intrare (factori controlabili) care se dovedesc cei mai insensibili la factorii zgomot. Exprimarea raportului S/N în dB independent de natura caracteristicilor măsurate permite compararea performanțelor mai multor caracteristici care se optimizează simultan.

Sunt menționate și planurile combinate, care reprezintă o configurație particulară a planurilor de experiențe și sunt folosite pentru studiul sensibilității unui sistem la factorii zgomot bine precizați. În planurile combinate se găsesc atât factorii controlați (care pilotează sistemul), cât și factorii zgomot (pe care îi suportă sistemul). Se utilizează două matrici (o matrice internă care conține factorii controlați și o matrice externă care conține factorii zgomot).

Programul s-a bazat pe aplicarea metodei de proiectare robustă Taguchi și a cuprins următoarele etape:

- stabilirea criteriului țintă și a tipului de optimizare impus. Astfel, s-a declarat drept criteriu – țintă indicatorul de rugozitate sintetic R_a , cu valoarea nominală de 0.8. Tipul de optimizare urmărit de-a lungul întregului program a fost cel încadrat în categoria *Valoarea nominală este cea mai bună (Nominal is the best)*
- alegerea unui echipament de prelucrare cu fascicul laser. Execuția efectivă a pieselor s-a desfășurat în Laboratoarele CALFA de la IUT Bethune, Universite D'Artois, care dețin o instalație de tăiat cu laser, având mediul activ CO_2 și puterea reglabilă de până la 2kW
- stabilirea pieselor de prelucrat. S-a optat pentru componentele unui reductor în două trepte cu raportul de transmite total egal cu 4 ($i = 2$ pe fiecare treaptă). Reductorul conține roți dințate cilindrice cu dinți drepți ($z_1=20$, $z_2=40$, $z_3=18$, $z_4=36$), executate dintr-un material plastic (policarbonat)
- identificarea factorilor de influență în proces și eventuale interacțiuni semnificative ale acestora. S-au declarat de interes șase factori (puterea, viteza, timpul de repaus, timpul de impuls, defocusarea și debitul de gaz) și o interacțiune (putere – viteză). Din punct de vedere practic, două niveluri ale acestor parametri au fost considerate suficiente

- proiectarea planului de experiențe Taguchi factorial fracționat. Aplicarea teoriei acestuia a condus la stabilirea numărului de experimente suficient pentru a fi relevant în procesul de optimizare. A rezultat un număr total de 40 de experimente (piese de prelucrat), constând în 8 eșantioane a câte cinci piese. Fiecare eșantion urmează să fie prelucrat la o anumită combinație ai factorilor de proces stabiliți
- realizarea practică a celor 40 de roți dințate
- măsurarea rugozității pieselor prin trasarea profilogramelor și deducerea celor mai importanți indicatori de rugozitate
- sistematizarea rezultatelor măsurărilor, pe eșantioanele corespunzătoare celor opt combinații de factori de influență și introducerea lor în planurile de experiențe, care operează automat întreg formalismul Taguchi.
- setarea criteriului *Nominal is the best* și a valorii nominale $R_a=0.8\mu\text{m}$, precum și a parametrului S/N Ratio – concept central în teoria Taguchi – în programul Qualitek
- rularea programului și interpretarea rezultatelor intermediare și finale ale optimizării automate. S-a obținut o combinație de factori de influențe cu valori numerice prescrise de program, astfel încât raportul S/N să crească de la ~ 18 la ~ 24 , să se reducă mult dispersia și să se elimine asimetria criteriului în raport cu valoarea – țintă. Valorile numerice preconizate prin utilizarea procesului optimizat, asigurau o îmbunătățire certă a calității lotului de piese
- validarea rezultatelor optimizării prin efectuarea unui experiment de confirmare. Pe instalația reglată astfel încât să se respecte valorile factorilor de influență indicați de programul Qualitek drept combinație optimă, s-au prelucrat un lot de cinci roți dințate. Introducerea datelor în program a pus în evidență valori practice superioare celor estimate la optimizare. Astfel, raportul S/N obținut a fost ~ 24.5 . De asemenea, dispersia rezultatelor a scăzut semnificativ (de la 0.25 la 0.047) și a dobândit un caracter simetric în raport cu valoarea – țintă. S-a realizat astfel scopul formulat de metoda Taguchi: creșterea numărului de piese conforme grupate în jurul valorii nominale a criteriului, în raport cu care este măsurată dispersia și judecată conformitatea.

Derularea programului a condus la câteva concluzii semnificative:

- procesul tehnologic de prelucrare a pieselor mecanice prin tăiere cu fascicul laser dirijat depinde de o serie de factori, a căror influență și interdependentă nu pot fi cuantificate și ierarhizate în mod intuitiv
- raționalizarea procesului în sensul găsirii unei combinații optime a factorilor de influență, cu consecințe directe asupra parametrilor statistici de calitate a pieselor, este posibilă pe baza unor metode fundamentate matematic, dintre care metoda robustă Taguchi s-a dovedit de mare succes
- aplicarea metodei necesită resurse minime, constând într-un lot restrâns de piese și un instrument soft de operare a algoritmilor
- practic, optimizarea de proces permite ca prin prelucrarea pe un utilaj dat să se obțină piese de calitate ridicată, în condiții de eficiență și precizie, care prin combinații aleatorii ale factorilor de proces, este foarte puțin probabil să poată fi obținută
- creșterea calității în sensul Taguchi reprezintă o îmbunătățire semnificativă a parametrilor statistici de calitate (reducerea și simetrizarea dispersiei, apropierea mediei de valoarea nominală), având drept consecință creșterea gradului de conformitate a pieselor dintr-un lot dat.

În prezentul capitol se regăsesc o serie de contribuții personale, printre care se numără și următoarele:

- proiectarea unui program experimental complex destinat creșterii eficienței și preciziei procesului de tăiere cu fascicul laser dirijat
- organizarea programului astfel încât să poată fi aplicată metoda de optimizare Taguchi a procesului
- proiectarea CAD/CAM până la generarea codului CN pentru piesele de studiu (roți dințate cilindrice cu dinți drepți din policarbonat)
- executarea lotului de 45 roți dințate necesare experimentului de optimizare și experimentului de confirmare, pe o instalație modernă de tăiere cu laser
- măsurarea parametrilor de rugozitate ai suprafețelor flancurilor roților dințate cu ajutorul unui aparat performant Mahr
- operarea cu ajutorul programului Qualitek, destinat execuției algoritmului propus de metoda Taguchi
- interpretarea rezultatelor furnizate de programul Qualitek, respectiv stabilirea valorilor numerice ale factorilor de proces cu influență maximă (putere, viteză, timp de repaus, timp de impuls, defocusare, debit de gaz)
- interpretarea secvențelor de rezultate prezentate de Qualitek referitor la parametrul specific Semnal/Zgomot, respectiv la parametrii statistici de calitate
- desfășurarea cu succes a unui experiment de confirmare.

[A2] [B7] [B8] [B11] [C2] [C5] [C6] [C7] [C8] [C12] [C13] [C14] [C15] [D2] [D3]
[D4] [E1] [F1] [F2] [L1] [L2] [N2] [N6] [P6] [P7] [P8] [T1] [T2] [T3] [T4] [T5] [T6]
[T7] [Z1] [***]

7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

Studiile din prezenta teză au pornit de la analiza aprofundată a cunoștințelor actuale privind teoria fundamentală și aplicațiile laserilor. Coroborarea unor materiale cu caracter puternic interdisciplinar, care vizează fizica laserilor, optica non – imaging, termodinamica, statistica, fiabilitatea, proiectarea experimentală a calității, aplicațiile laserilor în industrie, medicină, construcția aparatelor de măsurare, optoelectronice și de larg consum, au permis identificarea unor direcții de cercetare care să conducă la îmbunătățirea sau optimizarea unor parametri sau caracteristici specifice aplicațiilor laser.

Lucrarea se referă în mod direct la debitarea materialelor cu fascicul laser dirijat și are ca scop optimizarea prelucrării cu fascicul laser a roților dințate din material plastic, experimentele realizate urmărind corelarea parametrilor fasciculului laser și stabilirea valorilor nominale optime ale acestora, astfel încât să poată fi controlate forma, dimensiunile și indicatorii de stare a suprafeței roților, iar eficiența economică a prelucrării să fie maximă. Acest scop general a dobândit o formulare concretă prin declararea următoarelor obiective:

- determinarea parametrilor de influență a formei și mărimii petei de difuzie, respectiv a distribuției energetice pe suprafața acesteia, asupra preciziei și vitezei de tăiere a unui echipament de prelucrare cu fascicul laser
- optimizarea sistemului optic asociat unui echipament care utilizează un fascicul laser cu lungimea de undă de 10.6 μm , respectiv elaborarea unor algoritmi de proiectare a subsansamblurilor expandor și obiectiv de focalizare
- identificarea parametrilor care influențează precizia de prelucrare, respectiv indicatorii de calitate ai suprafeței pieselor prelucrate
- proiectarea și desfășurarea unui program experimental de optimizare a procesului de prelucrare în scopul obținerii valorilor optime ale celor mai importanți factori de influență (putere, durată a impulsului, durată a repausului, viteză de deplasare a capului de tăiere, defocusare și debitul de gaz), având drept criteriu țintă un parametru de stare a suprafeței unor roți dințate prelucrate prin tăiere cu laser
- determinări experimentale, necesare derulării programului experimental, constând în prelucrarea roților dințate din policarbonat, utilizând diverse combinații ale parametrilor de influență asupra procesului, în scopul aplicării metodei de proiectare robuste Taguchi și, respectiv, optimizării procesului de tăiere.

Accesarea cunoștințelor actuale din domeniile convergente subiectului tezei, utilizarea bazei materiale moderne și performante din Laboratoarele CALFA de la IUT Bethune, Universite D'Artois și din Laboratoarele Universității Politehnica din Timișoara, precum și exploatarea eficientă a cunoștințelor de informatică aplicată, au permis rezolvarea problemelor propuse în teză. Printre realizările cuprinse în lucrare se pot enumera:

- corelarea eficientă a cunoștințelor teoretice și practice dintr-o serie de discipline foarte diverse, necesare înțelegerii, dezvoltării și perfecționării unei aplicații laser

- implementarea metodei robuste de proiectare Taguchi în domeniul prelucrărilor mecanice cu fascicul laser, în scopul optimizării de proces
- identificarea structurii optime a sistemului optic de transport și focusare a fascicului laser asociat unei instalații de debitare a pieselor mecanice și a aspectelor specifice laserului IR utilizat pentru tăiere
- elaborarea algoritmilor de proiectare a expandorului și obiectivului de focalizare, conceperea și rularea unui program original, cu ajutorul căruia au rezultat soluții cu parametri non – imaging de cea mai bună calitate
- proiectarea și derularea unui program experimental de optimizare a parametrilor de proces, cu rezultate deosebit de favorabile pentru eficientizarea procesului tehnologic și creșterea calității statistice a lotului de piese prelucrate.

Teza contribuie la îmbogățirea cunoștințelor în domeniu printr-o sumă de elemente originale, rezumate mai jos:

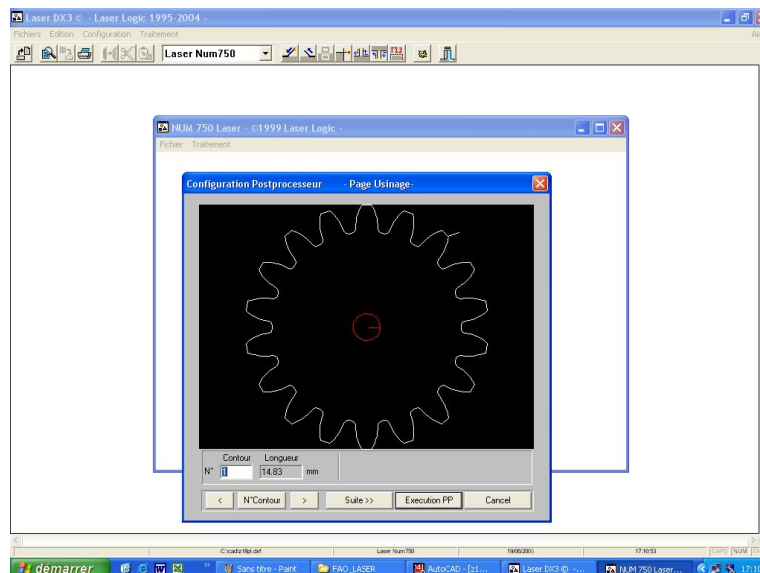
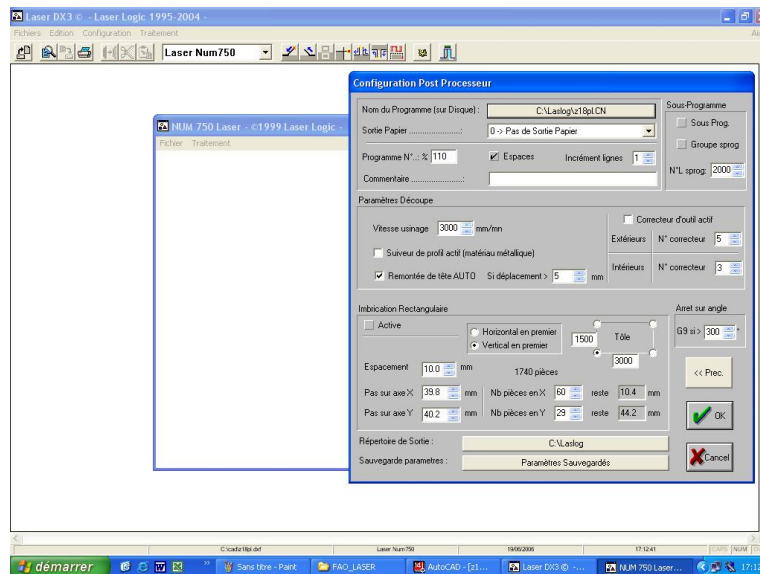
- sinteza materialului bibliografic ancorat în domeniul fundamental, care deși acoperă o arie vastă de cunoștințe din fizica particulelor, optica cuantică, termodinamică, electromagnetism și chimie, este compactat în câteva secvențe cu caracter cuprinzător și coerent privind mecanismele de stimulare a emisiei de radiație și de amplificare a acesteia
- sinteza cunoștințelor referitoare la proprietățile geometrice, optice și energetice ale fasciculelor laser, cu evidențierea oportunităților tehnice pe care aceste proprietăți le facilitează
- selectarea spre prezentare și descrierea principalelor soluții de surse laser disponibile în prezent
- selecția dintr-un material complex, interdisciplinar și cu caracter fundamental, care necesită corelarea unor concepte și legi ale termodinamicii, opticii, fizicii și chimiei, a secvențelor utile pentru dezvoltarea ulterioară în teză a aplicației concrete studiate și anume tăierea metalelor prin tehnologia neconvențională bazată pe interacțiunea fasciculelor laser cu structurile metalice
- identificarea factorilor de material și a parametrilor optici, geometrici și energetici ai laserilor, care permit tăierea metalelor cu fascicule laser și care influențează desfășurarea și rezultatele procesului de tăiere
- prezentarea detaliată a suportului teoretic de caracterizare a transferului de căldură, astfel încât să poată fi explicate și, consecutiv, controlate fenomenele de încălzire superficială și în masă a materialului iradiat, precum și efectele încălzirii (topire, vaporizare, sublimare, expulzare mecanică a unor fragmente materiale, izolarea fenomenelor termic active în zona petei de focalizare a fascicului, modificările structurale din vecinătatea conturului de prelucrare etc.)
- particularizarea ecuației clasice de transfer termic pentru un corp material tridimensional, omogen și izotrop pentru o serie de cazuri particulare specifice zonei de interacțiune structură materială – laser (spot laser extins și spot laser finit, cu principalele subcazuri: sursă continuă și sursă variabilă în timp, respectiv cu impulsuri modelate matematic în diverse formule – puls dreptunghiular, liniar crescător sau descrescător și gaussian); particularizările vizează atât suprafața unor structuri materiale groase – teoretic semiinfinite, precum și suprafața unor medii materiale subțiri în interacțiune cu fascicule laser
- identificarea celor mai importanți factori optici și energetici care influențează mărimea spotului laser focalizat și distribuția energetică pe suprafața petei focale de difuzie
- extragerea din literatura de specialitate a unui sumar relevant pentru aparatul matematic de tratare a sistemului optic asociat echipamentului de prelucrare cu

fascicul laser, cu observația inconsistenței suportului analitic pentru scopuri de proiectare, având parametri de ieșire impuși

- asimilarea softului Laser DX3 necesar desfășurării unui program experimental
- identificarea particularităților sistemelor optice asociate echipamentelor de prelucrare cu fascicul laser
- stabilirea unor corelații între parametrii geometrici și optici – imaging și non-imaging, astfel încât numărul datelor de intrare în proiectarea sistemului optic să fie minim și să nu conducă la incompatibilități, care să necesite intervenții repetate, iterative și fără criterii precizate, din partea operatorului
- elaborarea unui algoritm original de proiectare a sistemului optic expandor – obiectiv de focalizare, pe baza adaptării algoritmului de calcul de gabarit al lunetei Galilei inversate și a introducerii corelațiilor de parametri amintite mai sus
- elaborarea unui soft ca aplicație Microsoft Visual Basic, până la varianta executabilă, utilizabilă pentru proiectarea și sinteza componentelor sistemelor optice asociate laserilor de tăiere cu lungimea de undă de $10.6 \mu\text{m}$
- rularea programului cu date de intrare corespunzătoare determinărilor experimentale ulterioare
- obținerea unor soluții de sisteme optice performante, limitate la difracție, superioare celor din oferta actuală a pieței de profil
- analiza detaliată a sistemelor cu obiectiv sferic, respectiv asferic, cu evaluarea și discutarea unor parametri esențiali, printre care: diametrul minim al spotului, forma causticii, planul de focusare optim, distribuția energiei pe suprafața spotului laser, efectele defocusării și limitele acesteia în raport cu menținerea unei precizii de prelucrare date
- recomandări privind principiile de proiectare a legii de deplasare a capului de tăiere, astfel încât creșterea secțiunii causticii să afecteze cât mai puțin abaterea de la liniaritate a generatoarei conturului piesei prelucrate
- identificarea modalităților concrete, necesare optimizării de proces corespunzătoare prelucrării cu fascicul laser, dintr-un material extrem de bogat, sofisticat din punct de vedere logic și matematic, laborios ca execuție practică și cu caracter general, de largă adresabilitate, așa cum se prezintă metoda de proiectare robustă Taguchi
- proiectarea unui program experimental complex destinat creșterii eficienței și preciziei procesului de tăiere cu fascicul laser dirijat
- organizarea programului astfel încât să poată fi aplicată metoda de optimizare Taguchi a procesului
- proiectarea CAD/CAM până la generarea codului CN pentru piesele de studiu (roți dințate cilindrice cu dinți drepți din policarbonat)
- executarea lotului de 45 roți dințate necesare experimentului de optimizare și experimentului de confirmare, pe o instalație modernă de tăiere cu laser
- măsurarea parametrilor de rugozitate ai suprafețelor flancurilor roților dințate cu ajutorul unui aparat performant Mahr
- operarea cu ajutorul programului Qualitek, destinat execuției algoritmului propus de metoda Taguchi
- interpretarea rezultatelor furnizate de programul Qualitek, respectiv deducerea valorilor numerice ale factorilor de proces cu influență maximă (putere, viteză, timp de repaus, timp de impuls, defocusare, debit de gaz)
- interpretarea secvențelor de rezultate prezentate de Qualitek referitor la parametrul specific Semnal/Zgomot, respectiv la parametrii statistici de calitate
- desfășurarea cu succes a unui experiment suplimentar de confirmare.

ANEXE

Programme de exécution pour rotis d'ingate Z18

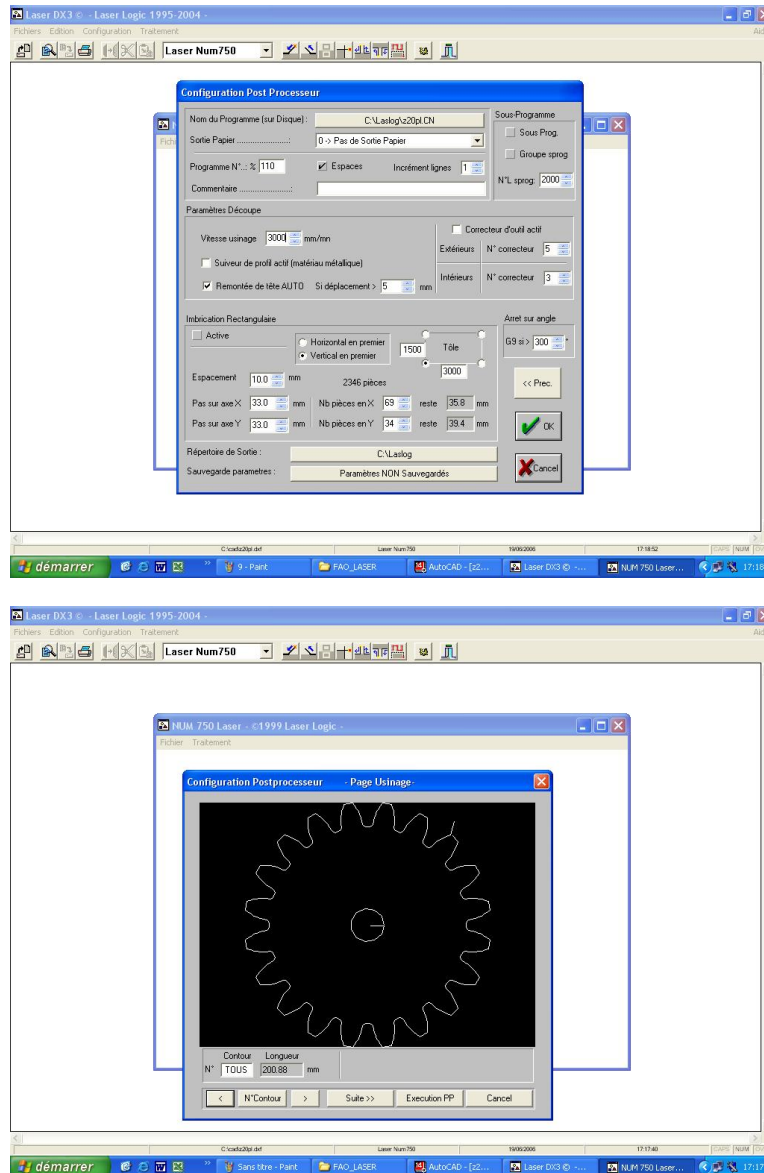


%110
N10 G90 (Mode Absolu)
N20 G0 Z0.
N30 G0 X0.360 Y-0.100
N40 G77 H3
N50 G77 H4
N60 G1 X2.258 F3000
N70 G2 X2.26 Y0. IO. JO.
N80 G77 H8
N90 G0 X15.256 Y15.585
N100 G77 H3
N110 G77 H4
N120 G1 X13.414 Y14.969 F3000
N130 G3 X12.321 Y15.881 IO. JO.
N140 G1 X11.749 Y15.66
N150 X11.237 Y15.422
N160 X10.741 Y15.145
N170 X10.267 Y14.827
N180 X9.824 Y14.468
N190 X9.419 Y14.071
N200 X8.871 Y13.481
N210 G2 X8.046 Y13.365 I8.387 J13.93
N220 G3 X7.551 Y13.651 IO. JO.
N230 G2 X7.239 Y14.423 I7.87 J14.228
N240 G1 X7.476 Y15.192
N250 X7.617 Y15.741
N260 X7.707 Y16.305
N270 X7.746 Y16.873
N280 X7.737 Y17.44
N290 X7.687 Y18.003
N300 X7.592 Y18.611
N310 G3 X6.147 Y19.137 IO. JO.
N320 G1 X5.684 Y18.734
N330 X5.284 Y18.335
N340 X4.913 Y17.905
N350 X4.577 Y17.445
N360 X4.283 Y16.955
N370 X4.038 Y16.444
N380 X3.725 Y15.702
N390 G2 X2.99 Y15.311 I3.117 J15.958
N400 G3 X2.427 Y15.41 IO. JO.
N410 G2 X1.87 Y16.029 I2.529 J16.062
N420 G1 X1.829 Y16.833
N430 X1.774 Y17.397
N440 X1.666 Y17.957
N450 X1.508 Y18.504
N460 X1.306 Y19.035
N470 X1.066 Y19.547
N480 X0.769 Y20.085
N490 G3 X-0.769 Y20.085 IO. JO.
N500 G1 X-1.066 Y19.548
N510 X-1.305 Y19.037
N520 X-1.507 Y18.506
N530 X-1.665 Y17.958
N540 X-1.774 Y17.398
N550 X-1.829 Y16.833
N560 X-1.87 Y16.029
N570 G2 X-2.426 Y15.41 I-2.529 J16.062
N580 G3 X-2.991 Y15.311 IO. JO.
N590 G2 X-3.725 Y15.702 I-3.117 J15.958
N600 G1 X-4.038 Y16.444
N1700 X-12.818 Y-12.685
N1710 X-13.049 Y-13.206
N1720 X-13.236 Y-13.742
N1730 X-13.381 Y-14.288
N1740 X-13.5 Y-14.892
N1750 G3 X-12.321 Y-15.881 IO. JO.
N1760 G1 X-11.749 Y-15.66
N1770 X-11.237 Y-15.422
N1780 X-10.741 Y-15.145
N1790 X-10.267 Y-14.827
N1800 X-9.824 Y-14.468
N1810 X-9.419 Y-14.071
N1820 X-8.871 Y-13.481
N1830 G2 X-8.046 Y-13.365 I-8.387 J-13.93
N1840 G3 X-7.551 Y-13.651 IO. JO.
N1850 G2 X-7.24 Y-14.424 I-7.87 J-14.228
N1860 G1 X-7.476 Y-15.192
N1870 X-7.617 Y-15.741
N1880 X-7.707 Y-16.305
N1890 X-7.746 Y-16.873
N1900 X-7.737 Y-17.44
N1910 X-7.687 Y-18.003
N1920 X-7.592 Y-18.611
N1930 G3 X-6.147 Y-19.137 IO. JO.
N1940 G1 X-5.684 Y-18.734
N1950 X-5.284 Y-18.335
N1960 X-4.913 Y-17.905
N1970 X-4.577 Y-17.445
N1980 X-4.283 Y-16.955
N1990 X-4.038 Y-16.444
N2000 X-3.725 Y-15.702
N2010 G2 X-2.99 Y-15.311 I-3.117 J-15.958
N2020 G3 X-2.427 Y-15.41 IO. JO.
N2030 G2 X-1.87 Y-16.029 I-2.529 J-16.062
N2040 G1 X-1.829 Y-16.833
N2050 X-1.774 Y-17.397
N2060 X-1.666 Y-17.957
N2070 X-1.508 Y-18.504
N2080 X-1.306 Y-19.035
N2090 X-1.066 Y-19.547
N2100 X-0.769 Y-20.085
N2110 G3 X0.769 Y-20.085 IO. JO.
N2120 G1 X1.066 Y-19.548
N2130 X1.305 Y-19.037
N2140 X1.507 Y-18.506
N2150 X1.665 Y-17.958
N2160 X1.774 Y-17.398
N2170 X1.829 Y-16.833
N2180 X1.87 Y-16.029
N2190 G2 X2.426 Y-15.41 I2.529 J-16.062
N2200 G3 X2.991 Y-15.311 IO. JO.
N2210 G2 X3.725 Y-15.702 I3.117 J-15.958
N2220 G1 X4.038 Y-16.444
N2230 X4.283 Y-16.955
N2240 X4.577 Y-17.444
N2250 X4.912 Y-17.904
N2260 X5.283 Y-18.334
N2270 X5.683 Y-18.733
N2280 X6.147 Y-19.137
N2290 G3 X7.592 Y-18.611 IO. JO.
N2300 G1 X7.687 Y-18.005

N610 X-4.283 Y16.955
N620 X-4.577 Y17.444
N630 X-4.912 Y17.904
N640 X-5.283 Y18.334
N650 X-5.683 Y18.733
N660 X-6.147 Y19.137
N670 G3 X-7.592 Y18.611 IO. JO.
N680 G1 X-7.687 Y18.005
N690 X-7.737 Y17.442
N700 X-7.746 Y16.874
N710 X-7.707 Y16.305
N720 X-7.617 Y15.742
N730 X-7.476 Y15.192
N740 X-7.239 Y14.423
N750 G2 X-7.55 Y13.651 I-7.87 J14.228
N760 G3 X-8.046 Y13.365 IO. JO.
N770 G2 X-8.871 Y13.481 I-8.387 J13.93
N780 G1 X-9.419 Y14.071
N790 X-9.824 Y14.467
N800 X-10.267 Y14.827
N810 X-10.739 Y15.144
N820 X-11.235 Y15.421
N830 X-11.748 Y15.659
N840 X-12.321 Y15.881
N850 G3 X-13.5 Y14.892 IO. JO.
N860 G1 X-13.381 Y14.29
N870 X-13.236 Y13.744
N880 X-13.05 Y13.207
N890 X-12.819 Y12.686
N900 X-12.542 Y12.187
N910 X-12.222 Y11.719
N920 X-11.736 Y11.077
N930 G2 X-11.764 Y10.246 I-12.262 J10.679
N940 G3 X-12.132 Y9.807 IO. JO.
N950 G2 X-12.947 Y9.634 I-12.646 J10.221
N960 G1 X-13.663 Y10.001
N970 X-14.18 Y10.235
N980 X-14.719 Y10.421
N990 X-15.271 Y10.558
N1000 X-15.832 Y10.648
N1010 X-16.395 Y10.697
N1020 X-17.01 Y10.709
N1030 G3 X-17.779 Y9.377 IO. JO.
N1040 G1 X-17.462 Y8.851
N1050 X-17.139 Y8.388
N1060 X-16.78 Y7.947
N1070 X-16.385 Y7.537
N1080 X-15.954 Y7.163
N1090 X-15.493 Y6.832
N1100 X-14.816 Y6.395
N1110 G2 X-14.559 Y5.604 I-15.175 J5.841
N1120 G3 X-14.755 Y5.066 IO. JO.
N1130 G2 X-15.461 Y4.625 I-15.379 J5.28
N1140 G1 X-16.26 Y4.725
N1150 X-16.825 Y4.768
N1160 X-17.395 Y4.758
N1170 X-17.961 Y4.698
N1180 X-18.519 Y4.591
N1190 X-19.065 Y4.444
N1200 X-19.647 Y4.245
N1210 G3 X-19.914 Y2.73 IO. JO.
N1220 G1 X-19.436 Y2.345
N2310 X7.737 Y-17.442
N2320 X7.746 Y-16.874
N2330 X7.707 Y-16.305
N2340 X7.617 Y-15.742
N2350 X7.476 Y-15.192
N2360 X7.239 Y-14.423
N2370 G2 X7.55 Y-13.651 I7.87 J-14.228
N2380 G3 X8.046 Y-13.365 IO. JO.
N2390 G2 X8.871 Y-13.481 I8.387 J-13.93
N2400 G1 X9.419 Y-14.071
N2410 X9.824 Y-14.467
N2420 X10.267 Y-14.827
N2430 X10.739 Y-15.144
N2440 X11.235 Y-15.421
N2450 X11.748 Y-15.659
N2460 X12.321 Y-15.881
N2470 G3 X13.5 Y-14.892 IO. JO.
N2480 G1 X13.381 Y-14.29
N2490 X13.236 Y-13.744
N2500 X13.05 Y-13.207
N2510 X12.819 Y-12.686
N2520 X12.542 Y-12.187
N2530 X12.222 Y-11.719
N2540 X11.736 Y-11.077
N2550 G2 X11.764 Y-10.246 I12.262 J-10.679
N2560 G3 X12.132 Y-9.807 IO. JO.
N2570 G2 X12.947 Y-9.634 I12.646 J-10.221
N2580 G1 X13.663 Y-10.001
N2590 X14.18 Y-10.235
N2600 X14.719 Y-10.421
N2610 X15.271 Y-10.558
N2620 X15.832 Y-10.648
N2630 X16.395 Y-10.697
N2640 X17.01 Y-10.709
N2650 G3 X17.779 Y-9.377 IO. JO.
N2660 G1 X17.462 Y-8.851
N2670 X17.139 Y-8.388
N2680 X16.78 Y-7.947
N2690 X16.385 Y-7.537
N2700 X15.954 Y-7.163
N2710 X15.493 Y-6.832
N2720 X14.816 Y-6.395
N2730 G2 X14.559 Y-5.604 I15.175 J-5.841
N2740 G3 X14.755 Y-5.066 IO. JO.
N2750 G2 X15.461 Y-4.625 I15.379 J-5.28
N2760 G1 X16.26 Y-4.725
N2770 X16.825 Y-4.768
N2780 X17.395 Y-4.758
N2790 X17.961 Y-4.698
N2800 X18.519 Y-4.591
N2810 X19.065 Y-4.444
N2820 X19.647 Y-4.245
N2830 G3 X19.914 Y-2.73 IO. JO.
N2840 G1 X19.436 Y-2.345
N2850 X18.974 Y-2.02
N2860 X18.486 Y-1.729
N2870 X17.974 Y-1.478
N2880 X17.441 Y-1.274
N2890 X16.895 Y-1.121
N2900 X16.111 Y-0.942
N2910 G2 X15.597 Y-0.285 I16.257 J-0.299

N1230 X-18.974 Y2.02
N1240 X-18.486 Y1.729
N1250 X-17.974 Y1.478
N1260 X-17.441 Y1.274
N1270 X-16.895 Y1.121
N1280 X-16.111 Y0.942
N1290 G2 X-15.597 Y0.285 I-16.257 J0.299
N1300 G3 X-15.597 Y-0.288 IO. JO.
N1310 G2 X-16.11 Y-0.942 I-16.257 J-0.299
N1320 G1 X-16.895 Y-1.121
N1330 X-17.441 Y-1.274
N1340 X-17.973 Y-1.478
N1350 X-18.485 Y-1.728
N1360 X-18.972 Y-2.019
N1370 X-19.435 Y-2.344
N1380 X-19.914 Y-2.73
N1390 G3 X-19.647 Y-4.245 IO. JO.
N1400 G1 X-19.066 Y-4.444
N1410 X-18.521 Y-4.591
N1420 X-17.963 Y-4.698
N1430 X-17.396 Y-4.758
N1440 X-16.825 Y-4.768
N1450 X-16.26 Y-4.725
N1460 X-15.461 Y-4.625
N1470 G2 X-14.755 Y-5.066 I-15.379 J-5.28
N1480 G3 X-14.559 Y-5.604 IO. JO.
N1490 G2 X-14.816 Y-6.395 I-15.175 J-5.841
N1500 G1 X-15.493 Y-6.832
N1510 X-15.953 Y-7.162
N1520 X-16.384 Y-7.536
N1530 X-16.779 Y-7.946
N1540 X-17.138 Y-8.387
N1550 X-17.461 Y-8.85
N1560 X-17.779 Y-9.377
N1570 G3 X-17.01 Y-10.709 IO. JO.
N1580 G1 X-16.396 Y-10.697
N1590 X-15.834 Y-10.649
N1600 X-15.273 Y-10.558
N1610 X-14.719 Y-10.421
N1620 X-14.18 Y-10.235
N1630 X-13.663 Y-10.001
N1640 X-12.946 Y-9.634
N1650 G2 X-12.133 Y-9.806 I-12.646 J-10.221
N1660 G3 X-11.764 Y-10.245 IO. JO.
N1670 G2 X-11.736 Y-11.077 I-12.262 J-10.679
N1680 G1 X-12.222 Y-11.719
N1690 X-12.542 Y-12.187
N2920 G3 X15.597 Y0.288 IO. JO.
N2930 G2 X16.11 Y0.942 I16.257 J0.299
N2940 G1 X16.895 Y1.121
N2950 X17.441 Y1.274
N2960 X17.973 Y1.478
N2970 X18.485 Y1.728
N2980 X18.972 Y2.019
N2990 X19.435 Y2.344
N3000 X19.914 Y2.73
N3010 G3 X19.647 Y4.245 IO. JO.
N3020 G1 X19.066 Y4.444
N3030 X18.521 Y4.591
N3040 X17.963 Y4.698
N3050 X17.396 Y4.758
N3060 X16.825 Y4.768
N3070 X16.26 Y4.725
N3080 X15.461 Y4.625
N3090 G2 X14.755 Y5.066 I15.379 J5.28
N3100 G3 X14.559 Y5.604 IO. JO.
N3110 G2 X14.816 Y6.395 I15.175 J5.841
N3120 G1 X15.493 Y6.832
N3130 X15.953 Y7.162
N3140 X16.384 Y7.536
N3150 X16.779 Y7.946
N3160 X17.138 Y8.387
N3170 X17.461 Y8.85
N3180 X17.779 Y9.377
N3190 G3 X17.01 Y10.709 IO. JO.
N3200 G1 X16.396 Y10.697
N3210 X15.834 Y10.649
N3220 X15.273 Y10.558
N3230 X14.719 Y10.421
N3240 X14.18 Y10.235
N3250 X13.663 Y10.001
N3260 X12.946 Y9.634
N3270 G2 X12.133 Y9.806 I12.646 J10.221
N3280 G3 X11.764 Y10.245 IO. JO.
N3290 G2 X11.736 Y11.077 I12.262 J10.679
N3300 G1 X12.222 Y11.719
N3310 X12.542 Y12.187
N3320 X12.818 Y12.685
N3330 X13.049 Y13.206
N3340 X13.236 Y13.742
N3350 X13.381 Y14.288
N3360 X13.489 Y14.836
N3370 G77 H8
N9998 G77 H9
N9999 M2

Z20



%110
 N10 G90 (Mode Absolu)
 N20 G0 Z0.
 N30 G0 X0.360 Y-0.100
 N40 G77 H3
 N50 G77 H4
 N60 G1 X2.258 F3000
 N70 G2 X2.26 Y0. I0. J0.
 N80 G77 H8
 N90 G0 X11.632 Y14.017

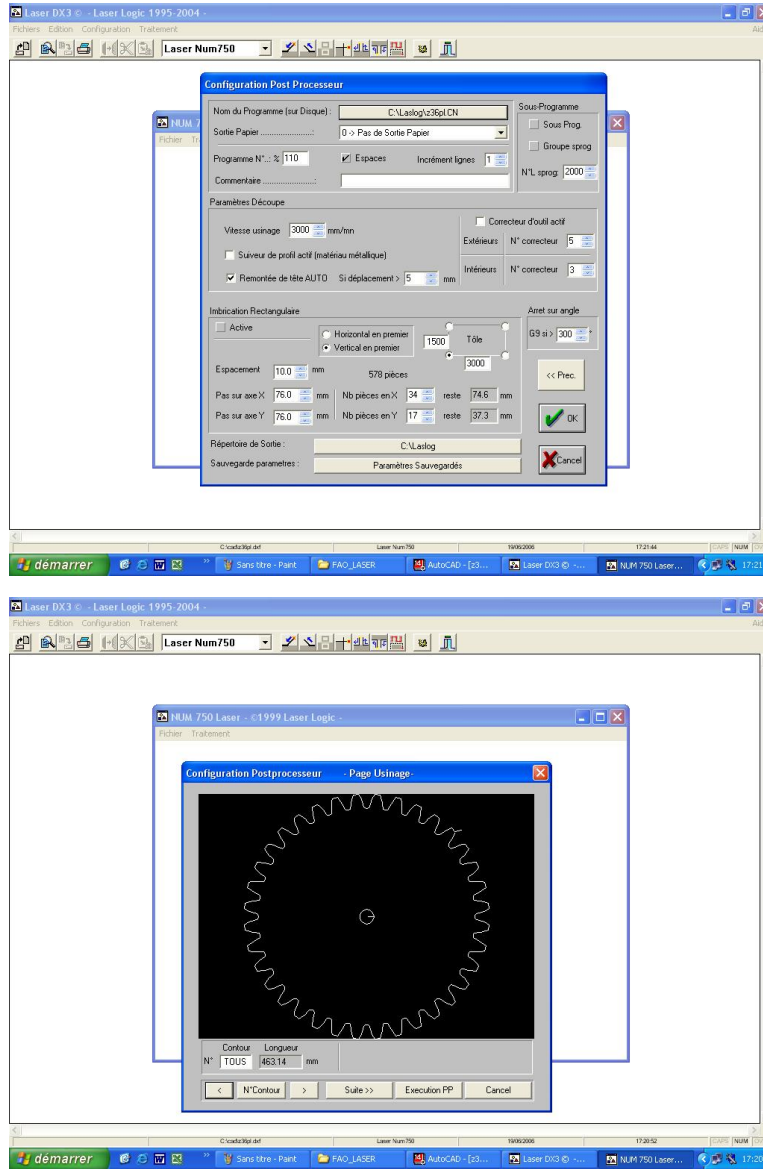
N1880 X-11.675 Y-10.021
 N1890 X-11.86 Y-10.423
 N1900 X-12.015 Y-10.833
 N1910 X-12.159 Y-11.301
 N1920 G3 X-11.301 Y-12.159 I0. J0.
 N1930 G1 X-10.832 Y-12.015
 N1940 X-10.422 Y-11.86
 N1950 X-10.021 Y-11.675
 N1960 X-9.635 Y-11.458
 N1970 X-9.267 Y-11.209

N100 G77 H3
N110 G77 H4
N120 G1 X11.191 Y12.125 F3000
N130 X10.832 Y12.015
N140 X10.422 Y11.86
N150 X10.021 Y11.675
N160 X9.635 Y11.458
N170 X9.267 Y11.209
N180 X8.926 Y10.932
N190 X8.544 Y10.593
N200 G2 X7.95 Y10.568 I8.232 J10.945
N210 G3 X7.596 Y10.826 IO. JO.
N220 G2 X7.434 Y11.4 I7.865 J11.211
N230 G1 X7.639 Y11.867
N240 X7.797 Y12.278
N250 X7.92 Y12.704
N260 X8.007 Y13.139
N270 X8.059 Y13.577
N280 X8.08 Y14.016
N290 X8.071 Y14.506
N300 G3 X6.991 Y15.056 IO. JO.
N310 G1 X6.589 Y14.774
N320 X6.247 Y14.5
N330 X5.923 Y14.2
N340 X5.622 Y13.875
N350 X5.35 Y13.525
N360 X5.111 Y13.155
N370 X4.853 Y12.716
N380 G2 X4.295 Y12.508 I4.447 J12.953
N390 G3 X3.878 Y12.643 IO. JO.
N400 G2 X3.548 Y13.139 I4.016 J13.093
N410 G1 X3.598 Y13.647
N420 X3.621 Y14.086
N430 X3.607 Y14.53
N440 X3.555 Y14.97
N450 X3.469 Y15.403
N460 X3.353 Y15.827
N470 X3.194 Y16.29
N480 G3 X1.996 Y16.48 IO. JO.
N490 G1 X1.701 Y16.087
N500 X1.46 Y15.72
N510 X1.245 Y15.335
N520 X1.06 Y14.933
N530 X0.909 Y14.516
N540 X0.795 Y14.091
N550 X0.686 Y13.592
N560 G2 X0.218 Y13.223 IO.227 J13.693
N570 G3 X-0.218 Y13.223 IO. JO.
N580 G2 X-0.686 Y13.592 I-0.227 J13.693
N590 G1 X-0.795 Y14.091
N600 X-0.909 Y14.516
N610 X-1.06 Y14.933
N620 X-1.245 Y15.336
N630 X-1.461 Y15.721
N640 X-1.702 Y16.088
N650 X-1.996 Y16.48
N660 G3 X-3.194 Y16.29 IO. JO.
N670 G1 X-3.353 Y15.826
N680 X-3.469 Y15.402
N690 X-3.555 Y14.969
N700 X-3.607 Y14.53
N710 X-3.621 Y14.086
N1980 X-8.926 Y-10.932
N1990 X-8.544 Y-10.593
N2000 G2 X-7.95 Y-10.568 I-8.232 J-10.945
N2010 G3 X-7.596 Y-10.826 IO. JO.
N2020 G2 X-7.434 Y-11.4 I-7.865 J-11.211
N2030 G1 X-7.639 Y-11.867
N2040 X-7.797 Y-12.278
N2050 X-7.92 Y-12.704
N2060 X-8.007 Y-13.139
N2070 X-8.059 Y-13.577
N2080 X-8.08 Y-14.016
N2090 X-8.071 Y-14.506
N2100 G3 X-6.991 Y-15.056 IO. JO.
N2110 G1 X-6.589 Y-14.774
N2120 X-6.247 Y-14.5
N2130 X-5.923 Y-14.2
N2140 X-5.622 Y-13.875
N2150 X-5.35 Y-13.525
N2160 X-5.111 Y-13.155
N2170 X-4.853 Y-12.715
N2180 G2 X-4.295 Y-12.508 I-4.447 J-12.953
N2190 G3 X-3.878 Y-12.643 IO. JO.
N2200 G2 X-3.548 Y-13.139 I-4.016 J-13.093
N2210 G1 X-3.598 Y-13.647
N2220 X-3.621 Y-14.086
N2230 X-3.607 Y-14.53
N2240 X-3.555 Y-14.97
N2250 X-3.469 Y-15.403
N2260 X-3.353 Y-15.827
N2270 X-3.194 Y-16.29
N2280 G3 X-1.996 Y-16.48 IO. JO.
N2290 G1 X-1.701 Y-16.087
N2300 X-1.46 Y-15.72
N2310 X-1.245 Y-15.335
N2320 X-1.06 Y-14.933
N2330 X-0.909 Y-14.516
N2340 X-0.795 Y-14.091
N2350 X-0.686 Y-13.593
N2360 G2 X-0.218 Y-13.223 I-0.227 J-13.693
N2370 G3 X0.218 Y-13.223 IO. JO.
N2380 G2 X0.686 Y-13.592 IO.227 J-13.693
N2390 G1 X0.795 Y-14.091
N2400 X0.909 Y-14.516
N2410 X1.06 Y-14.933
N2420 X1.245 Y-15.336
N2430 X1.461 Y-15.721
N2440 X1.702 Y-16.088
N2450 X1.996 Y-16.48
N2460 G3 X3.194 Y-16.29 IO. JO.
N2470 G1 X3.353 Y-15.826
N2480 X3.469 Y-15.402
N2490 X3.555 Y-14.969
N2500 X3.607 Y-14.53
N2510 X3.621 Y-14.086
N2520 X3.598 Y-13.647
N2530 X3.548 Y-13.139
N2540 G2 X3.877 Y-12.644 I4.016 J-13.093
N2550 G3 X4.295 Y-12.508 IO. JO.
N2560 G2 X4.853 Y-12.715 I4.447 J-12.953
N2570 G1 X5.111 Y-13.155
N2580 X5.35 Y-13.525
N2590 X5.623 Y-13.875

N720 X-3.598 Y13.647
N730 X-3.548 Y13.139
N740 G2 X-3.877 Y12.644 I-4.016 J13.093
N750 G3 X-4.295 Y12.508 IO. JO.
N760 G2 X-4.853 Y12.715 I-4.447 J12.953
N770 G1 X-5.111 Y13.155
N780 X-5.35 Y13.525
N790 X-5.623 Y13.875
N800 X-5.923 Y14.2
N810 X-6.247 Y14.5
N820 X-6.59 Y14.775
N830 X-6.991 Y15.056
N840 G3 X-8.071 Y14.506 IO. JO.
N850 G1 X-8.08 Y14.015
N860 X-8.059 Y13.576
N870 X-8.007 Y13.138
N880 X-7.92 Y12.704
N890 X-7.797 Y12.278
N900 X-7.639 Y11.867
N910 X-7.434 Y11.4
N920 G2 X-7.594 Y10.827 I-7.865 J11.211
N930 G3 X-7.949 Y10.569 IO. JO.
N940 G2 X-8.545 Y10.594 I-8.232 J10.945
N950 G1 X-8.926 Y10.932
N960 X-9.268 Y11.21
N970 X-9.635 Y11.458
N980 X-10.021 Y11.675
N990 X-10.423 Y11.86
N1000 X-10.833 Y12.015
N1010 X-11.301 Y12.159
N1020 G3 X-12.159 Y11.301 IO. JO.
N1030 G1 X-12.015 Y10.832
N1040 X-11.86 Y10.422
N1050 X-11.675 Y10.021
N1060 X-11.458 Y9.635
N1070 X-11.209 Y9.267
N1080 X-10.932 Y8.926
N1090 X-10.593 Y8.544
N1100 G2 X-10.568 Y7.95 I-10.945 J8.232
N1110 G3 X-10.826 Y7.596 IO. JO.
N1120 G2 X-11.4 Y7.434 I-11.211 J7.865
N1130 G1 X-11.867 Y7.639
N1140 X-12.278 Y7.797
N1150 X-12.704 Y7.92
N1160 X-13.139 Y8.007
N1170 X-13.577 Y8.059
N1180 X-14.016 Y8.08
N1190 X-14.506 Y8.071
N1200 G3 X-15.056 Y6.991 IO. JO.
N1210 G1 X-14.774 Y6.589
N1220 X-14.5 Y6.247
N1230 X-14.2 Y5.923
N1240 X-13.875 Y5.622
N1250 X-13.525 Y5.35
N1260 X-13.155 Y5.111
N1270 X-12.716 Y4.853
N1280 G2 X-12.508 Y4.295 I-12.953 J4.447
N1290 G3 X-12.643 Y3.878 IO. JO.
N1300 G2 X-13.139 Y3.548 I-13.093 J4.016
N1310 G1 X-13.647 Y3.598
N1320 X-14.086 Y3.621
N1330 X-14.53 Y3.607
N2600 X5.923 Y-14.2
N2610 X6.247 Y-14.5
N2620 X6.59 Y-14.775
N2630 X6.991 Y-15.056
N2640 G3 X8.071 Y-14.506 IO. JO.
N2650 G1 X8.08 Y-14.015
N2660 X8.059 Y-13.576
N2670 X8.007 Y-13.138
N2680 X7.92 Y-12.704
N2690 X7.797 Y-12.278
N2700 X7.639 Y-11.867
N2710 X7.434 Y-11.4
N2720 G2 X7.594 Y-10.827 I7.865 J-11.211
N2730 G3 X7.949 Y-10.569 IO. JO.
N2740 G2 X8.545 Y-10.594 I8.232 J-10.945
N2750 G1 X8.926 Y-10.932
N2760 X9.268 Y-11.21
N2770 X9.635 Y-11.458
N2780 X10.021 Y-11.675
N2790 X10.423 Y-11.86
N2800 X10.833 Y-12.015
N2810 X11.301 Y-12.159
N2820 G3 X12.159 Y-11.301 IO. JO.
N2830 G1 X12.015 Y-10.832
N2840 X11.86 Y-10.422
N2850 X11.675 Y-10.021
N2860 X11.458 Y-9.635
N2870 X11.209 Y-9.267
N2880 X10.932 Y-8.926
N2890 X10.593 Y-8.544
N2900 G2 X10.568 Y-7.95 I10.945 J-8.232
N2910 G3 X10.826 Y-7.596 IO. JO.
N2920 G2 X11.4 Y-7.434 I11.211 J-7.865
N2930 G1 X11.867 Y-7.639
N2940 X12.278 Y-7.797
N2950 X12.704 Y-7.92
N2960 X13.139 Y-8.007
N2970 X13.577 Y-8.059
N2980 X14.016 Y-8.08
N2990 X14.506 Y-8.071
N3000 G3 X15.056 Y-6.991 IO. JO.
N3010 G1 X14.774 Y-6.589
N3020 X14.5 Y-6.247
N3030 X14.2 Y-5.923
N3040 X13.875 Y-5.622
N3050 X13.525 Y-5.35
N3060 X13.155 Y-5.111
N3070 X12.715 Y-4.853
N3080 G2 X12.508 Y-4.295 I12.953 J-4.447
N3090 G3 X12.643 Y-3.878 IO. JO.
N3100 G2 X13.139 Y-3.548 I13.093 J-4.016
N3110 G1 X13.647 Y-3.598
N3120 X14.086 Y-3.621
N3130 X14.53 Y-3.607
N3140 X14.97 Y-3.555
N3150 X15.403 Y-3.469
N3160 X15.827 Y-3.353
N3170 X16.29 Y-3.194
N3180 G3 X16.48 Y-1.996 IO. JO.
N3190 G1 X16.087 Y-1.701
N3200 X15.72 Y-1.46
N3210 X15.335 Y-1.245

N1340 X-14.97 Y3.555
N1350 X-15.403 Y3.469
N1360 X-15.827 Y3.353
N1370 X-16.29 Y3.194
N1380 G3 X-16.48 Y1.996 IO. JO.
N1390 G1 X-16.087 Y1.701
N1400 X-15.72 Y1.46
N1410 X-15.335 Y1.245
N1420 X-14.933 Y1.06
N1430 X-14.516 Y0.909
N1440 X-14.091 Y0.795
N1450 X-13.592 Y0.686
N1460 G2 X-13.223 Y0.218 I-13.693 JO.227
N1470 G3 X-13.223 Y-0.218 IO. JO.
N1480 G2 X-13.592 Y-0.686 I-13.693 J-0.227
N1490 G1 X-14.091 Y-0.795
N1500 X-14.516 Y-0.909
N1510 X-14.933 Y-1.06
N1520 X-15.336 Y-1.245
N1530 X-15.721 Y-1.461
N1540 X-16.088 Y-1.702
N1550 X-16.48 Y-1.996
N1560 G3 X-16.29 Y-3.194 IO. JO.
N1570 G1 X-15.826 Y-3.353
N1580 X-15.402 Y-3.469
N1590 X-14.969 Y-3.555
N1600 X-14.53 Y-3.607
N1610 X-14.086 Y-3.621
N1620 X-13.647 Y-3.598
N1630 X-13.139 Y-3.548
N1640 G2 X-12.644 Y-3.877 I-13.093 J-4.016
N1650 G3 X-12.508 Y-4.295 IO. JO.
N1660 G2 X-12.715 Y-4.853 I-12.953 J-4.447
N1670 G1 X-13.155 Y-5.111
N1680 X-13.525 Y-5.35
N1690 X-13.875 Y-5.623
N1700 X-14.2 Y-5.923
N1710 X-14.5 Y-6.247
N1720 X-14.775 Y-6.59
N1730 X-15.056 Y-6.991
N1740 G3 X-14.506 Y-8.071 IO. JO.
N1750 G1 X-14.015 Y-8.08
N1760 X-13.576 Y-8.059
N1770 X-13.138 Y-8.007
N1780 X-12.704 Y-7.92
N1790 X-12.278 Y-7.797
N1800 X-11.867 Y-7.639
N1810 X-11.4 Y-7.434
N1820 G2 X-10.827 Y-7.594 I-11.211 J-7.865
N1830 G3 X-10.569 Y-7.949 IO. JO.
N1840 G2 X-10.594 Y-8.545 I-10.945 J-8.232
N1850 G1 X-10.932 Y-8.926
N1860 X-11.21 Y-9.268
N1870 X-11.458 Y-9.635
N3220 X14.933 Y-1.06
N3230 X14.516 Y-0.909
N3240 X14.091 Y-0.795
N3250 X13.592 Y-0.686
N3260 G2 X13.223 Y-0.218 I13.693 J-0.227
N3270 G3 X13.223 Y0.218 IO. JO.
N3280 G2 X13.592 Y0.686 I13.693 JO.227
N3290 G1 X14.091 Y0.795
N3300 X14.516 Y0.909
N3310 X14.933 Y1.06
N3320 X15.336 Y1.245
N3330 X15.721 Y1.461
N3340 X16.088 Y1.702
N3350 X16.48 Y1.996
N3360 G3 X16.29 Y3.194 IO. JO.
N3370 G1 X15.826 Y3.353
N3380 X15.402 Y3.469
N3390 X14.969 Y3.555
N3400 X14.53 Y3.607
N3410 X14.086 Y3.621
N3420 X13.647 Y3.598
N3430 X13.139 Y3.548
N3440 G2 X12.644 Y3.877 I13.093 J4.016
N3450 G3 X12.508 Y4.295 IO. JO.
N3460 G2 X12.715 Y4.853 I12.953 J4.447
N3470 G1 X13.155 Y5.111
N3480 X13.525 Y5.35
N3490 X13.875 Y5.623
N3500 X14.2 Y5.923
N3510 X14.5 Y6.247
N3520 X14.775 Y6.59
N3530 X15.056 Y6.991
N3540 G3 X14.506 Y8.071 IO. JO.
N3550 G1 X14.015 Y8.08
N3560 X13.576 Y8.059
N3570 X13.138 Y8.007
N3580 X12.704 Y7.92
N3590 X12.278 Y7.797
N3600 X11.867 Y7.639
N3610 X11.4 Y7.434
N3620 G2 X10.827 Y7.594 I11.211 J7.865
N3630 G3 X10.569 Y7.949 IO. JO.
N3640 G2 X10.594 Y8.545 I10.945 J8.232
N3650 G1 X10.932 Y8.926
N3660 X11.21 Y9.268
N3670 X11.458 Y9.635
N3680 X11.675 Y10.021
N3690 X11.86 Y10.423
N3700 X12.015 Y10.833
N3710 X12.159 Y11.301
N3720 G3 X11.344 Y12.119 IO. JO.
N3730 G77 H8
N9998 G77 H9
N9999 M2

Z36



%110
 N10 G90 (Mode Absolu)
 N20 G0 Z0.
 N30 G0 X0.360 Y-0.100
 N40 G77 H3
 N50 G77 H4
 N60 G1 X2.258 F3000
 N70 G2 X2.26 Y0. IO. JO.
 N80 G77 H8
 N90 G0 X29.373 Y26.787
 N100 G77 H3

N2600 G1 X-26.041 Y-23.315
 N2610 X-26.492 Y-24.031
 N2620 X-26.891 Y-24.772
 N2630 X-27.236 Y-25.523
 N2640 X-27.547 Y-26.32
 N2650 G3 X-26.32 Y-27.547 IO. JO.
 N2660 G1 X-25.523 Y-27.236
 N2670 X-24.774 Y-26.892
 N2680 X-24.033 Y-26.493
 N2690 X-23.316 Y-26.042
 N2700 X-22.641 Y-25.549

N110 G77 H4
N120 G1 X27.465 Y26.406 F3000
N130 G3 X26.32 Y27.547 I0. J0.
N140 G1 X25.523 Y27.236
N150 X24.774 Y26.892
N160 X24.033 Y26.493
N170 X23.316 Y26.042
N180 X22.641 Y25.549
N190 G2 X21.804 Y25.564 I22.232 J26.067
N200 G3 X21.39 Y25.912 I0. J0.
N210 G2 X21.229 Y26.734 I21.81 J26.421
N220 G1 X21.597 Y27.482
N230 X21.916 Y28.266
N240 X22.181 Y29.065
N250 X22.39 Y29.865
N260 X22.558 Y30.704
N270 G3 X21.137 Y31.699 I0. J0.
N280 G1 X20.406 Y31.255
N290 X19.727 Y30.786
N300 X19.067 Y30.264
N310 X18.44 Y29.695
N320 X17.861 Y29.092
N330 G2 X17.033 Y28.963 I17.368 J29.531
N340 G3 X16.566 Y29.232 I0. J0.
N350 G2 X16.264 Y30.014 I16.891 J29.807
N360 G1 X16.496 Y30.815
N370 X16.675 Y31.642
N380 X16.797 Y32.476
N390 X16.864 Y33.299
N400 X16.884 Y34.155
N410 G3 X15.311 Y34.888 I0. J0.
N420 G1 X14.669 Y34.323
N430 X14.082 Y33.743
N440 X13.522 Y33.115
N450 X13.003 Y32.446
N460 X12.538 Y31.752
N470 G2 X11.745 Y31.48 I11.976 J32.099
N480 G3 X11.237 Y31.665 I0. J0.
N490 G2 X10.805 Y32.382 I11.459 J32.287
N500 G1 X10.895 Y33.211
N510 X10.927 Y34.057
N520 X10.903 Y34.899
N530 X10.826 Y35.721
N540 X10.696 Y36.568
N550 G3 X9.021 Y37.017 I0. J0.
N560 G1 X8.486 Y36.349
N570 X8.008 Y35.676
N580 X7.566 Y34.96
N590 X7.171 Y34.211
N600 X6.833 Y33.447
N610 G2 X6.1 Y33.042 I6.22 J33.691
N620 G3 X5.568 Y33.135 I0. J0.
N630 G2 X5.018 Y33.767 I5.678 J33.786
N640 G1 X4.962 Y34.599
N650 X4.847 Y35.437
N660 X4.677 Y36.262
N670 X4.458 Y37.059
N680 X4.184 Y37.87
N690 G3 X2.456 Y38.021 I0. J0.
N700 G1 X2.045 Y37.27
N710 X1.692 Y36.525
N720 X1.381 Y35.743
N730 X1.122 Y34.937
N740 X0.922 Y34.125
N2710 G2 X-21.804 Y-25.564 I-22.232 J-26.067
N2720 G3 X-21.39 Y-25.912 I0. J0.
N2730 G2 X-21.229 Y-26.734 I-21.81 J-26.421
N2740 G1 X-21.597 Y-27.482
N2750 X-21.916 Y-28.266
N2760 X-22.181 Y-29.065
N2770 X-22.39 Y-29.865
N2780 X-22.558 Y-30.704
N2790 G3 X-21.137 Y-31.699 I0. J0.
N2800 G1 X-20.406 Y-31.255
N2810 X-19.727 Y-30.786
N2820 X-19.067 Y-30.264
N2830 X-18.44 Y-29.695
N2840 X-17.861 Y-29.092
N2850 G2 X-17.033 Y-28.963 I-17.368 J-29.531
N2860 G3 X-16.566 Y-29.232 I0. J0.
N2870 G2 X-16.264 Y-30.014 I-16.891 J-29.807
N2880 G1 X-16.496 Y-30.815
N2890 X-16.675 Y-31.642
N2900 X-16.797 Y-32.476
N2910 X-16.864 Y-33.299
N2920 X-16.884 Y-34.155
N2930 G3 X-15.311 Y-34.888 I0. J0.
N2940 G1 X-14.669 Y-34.323
N2950 X-14.082 Y-33.743
N2960 X-13.522 Y-33.115
N2970 X-13.003 Y-32.446
N2980 X-12.538 Y-31.752
N2990 G2 X-11.745 Y-31.48 I-11.976 J-32.099
N3000 G3 X-11.237 Y-31.665 I0. J0.
N3010 G2 X-10.805 Y-32.382 I-11.459 J-32.287
N3020 G1 X-10.895 Y-33.211
N3030 X-10.927 Y-34.057
N3040 X-10.903 Y-34.899
N3050 X-10.826 Y-35.721
N3060 X-10.696 Y-36.568
N3070 G3 X-9.021 Y-37.017 I0. J0.
N3080 G1 X-8.486 Y-36.349
N3090 X-8.008 Y-35.676
N3100 X-7.566 Y-34.96
N3110 X-7.171 Y-34.211
N3120 X-6.833 Y-33.447
N3130 G2 X-6.1 Y-33.042 I-6.22 J-33.691
N3140 G3 X-5.568 Y-33.135 I0. J0.
N3150 G2 X-5.018 Y-33.767 I-5.678 J-33.786
N3160 G1 X-4.962 Y-34.599
N3170 X-4.847 Y-35.437
N3180 X-4.677 Y-36.262
N3190 X-4.458 Y-37.059
N3200 X-4.184 Y-37.87
N3210 G3 X-2.456 Y-38.021 I0. J0.
N3220 G1 X-2.045 Y-37.27
N3230 X-1.692 Y-36.525
N3240 X-1.381 Y-35.743
N3250 X-1.122 Y-34.937
N3260 X-0.922 Y-34.125
N3270 G2 X-0.27 Y-33.599 I-0.275 J-34.259
N3280 G3 X0.27 Y-33.599 I0. J0.
N3290 G2 X0.922 Y-34.125 I0.275 J-34.259
N3300 G1 X1.121 Y-34.935

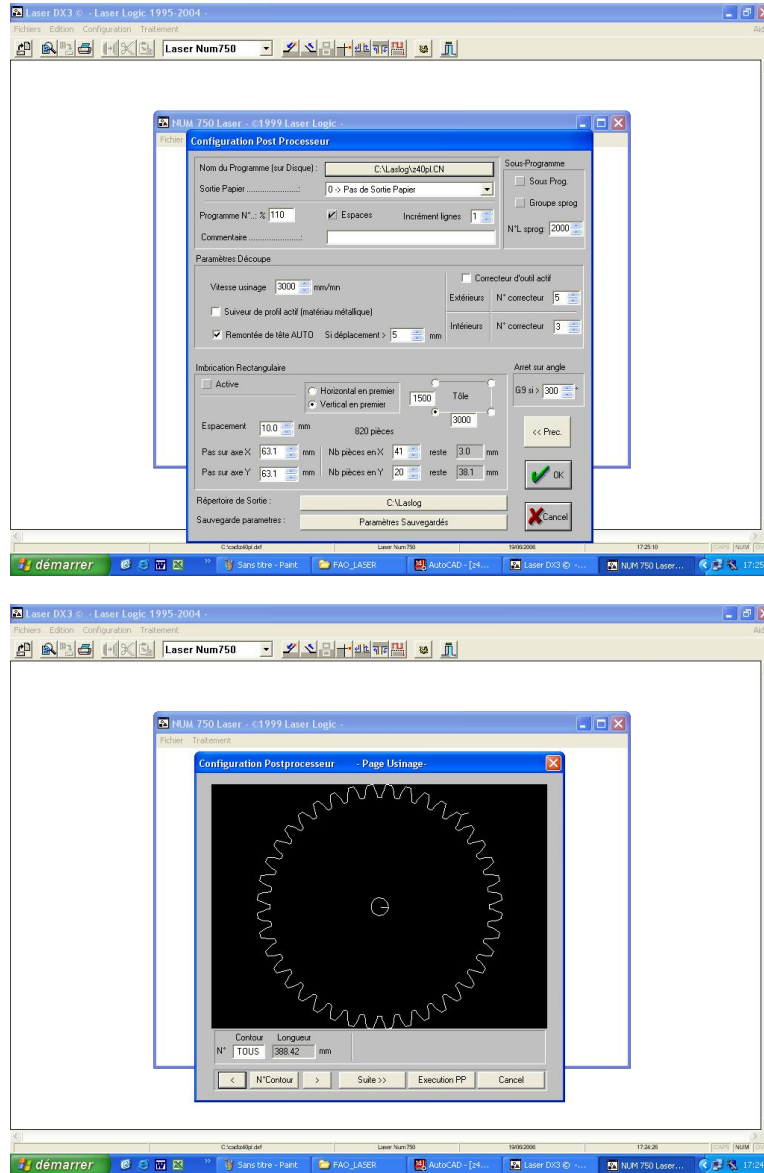
N750 G2 X0.27 Y33.599 I0.275 J34.259
 N760 G3 X-0.27 Y33.599 I0. JO.
 N770 G2 X-0.922 Y34.125 I-0.275 J34.259
 N780 G1 X-1.121 Y34.935
 N790 X-1.38 Y35.74
 N800 X-1.691 Y36.523
 N810 X-2.045 Y37.27
 N820 X-2.456 Y38.021
 N830 G3 X-4.184 Y37.87 I0. JO.
 N840 G1 X-4.458 Y37.059
 N850 X-4.676 Y36.264
 N860 X-4.847 Y35.439
 N870 X-4.962 Y34.601
 N880 X-5.018 Y33.767
 N890 G2 X-5.568 Y33.135 I-5.678 J33.786
 N900 G3 X-6.101 Y33.042 I0. JO.
 N910 G2 X-6.833 Y33.447 I-6.22 J33.691
 N920 G1 X-7.171 Y34.209
 N930 X-7.565 Y34.958
 N940 X-8.008 Y35.675
 N950 X-8.485 Y36.348
 N960 X-9.021 Y37.017
 N970 G3 X-10.696 Y36.568 I0. JO.
 N980 G1 X-10.826 Y35.722
 N990 X-10.903 Y34.901
 N1000 X-10.927 Y34.059
 N1010 X-10.895 Y33.213
 N1020 X-10.806 Y32.382
 N1030 G2 X-11.238 Y31.665 I-11.459 J32.287
 N1040 G3 X-11.745 Y31.48 I0. JO.
 N1050 G2 X-12.538 Y31.752 I-11.976 J32.099
 N1060 G1 X-13.002 Y32.445
 N1070 X-13.521 Y33.113
 N1080 X-14.081 Y33.742
 N1090 X-14.668 Y34.323
 N1100 X-15.311 Y34.888
 N1110 G3 X-16.884 Y34.155 I0. JO.
 N1120 G1 X-16.864 Y33.3
 N1130 X-16.797 Y32.477
 N1140 X-16.676 Y31.644
 N1150 X-16.497 Y30.817
 N1160 X-16.264 Y30.014
 N1170 G2 X-16.565 Y29.233 I-16.891 J29.807
 N1180 G3 X-17.034 Y28.962 I0. JO.
 N1190 G2 X-17.861 Y29.092 I-17.368 J29.531
 N1200 G1 X-18.438 Y29.694
 N1210 X-19.065 Y30.262
 N1220 X-19.726 Y30.785
 N1230 X-20.406 Y31.254
 N1240 X-21.137 Y31.699
 N1250 G3 X-22.558 Y30.704 I0. JO.
 N1260 G1 X-22.39 Y29.865
 N1270 X-22.182 Y29.067
 N1280 X-21.917 Y28.268
 N1290 X-21.598 Y27.484
 N1300 X-21.229 Y26.734
 N1310 G2 X-21.39 Y25.912 I-21.81 J26.421
 N1320 G3 X-21.804 Y25.564 I0. JO.
 N1330 G2 X-22.641 Y25.549 I-22.232 J26.067
 N1340 G1 X-23.315 Y26.041
 N1350 X-24.031 Y26.492
 N1360 X-24.772 Y26.891
 N1370 X-25.523 Y27.236
 N1380 X-26.32 Y27.547
 N3310 X1.38 Y-35.74
 N3320 X1.691 Y-36.523
 N3330 X2.045 Y-37.27
 N3340 X2.456 Y-38.021
 N3350 G3 X4.184 Y-37.87 I0. JO.
 N3360 G1 X4.458 Y-37.059
 N3370 X4.676 Y-36.264
 N3380 X4.847 Y-35.439
 N3390 X4.962 Y-34.601
 N3400 X5.018 Y-33.767
 N3410 G2 X5.568 Y-33.135 I5.678 J-33.786
 N3420 G3 X6.101 Y-33.042 I0. JO.
 N3430 G2 X6.833 Y-33.447 I6.22 J-33.691
 N3440 G1 X7.171 Y-34.209
 N3450 X7.565 Y-34.958
 N3460 X8.008 Y-35.675
 N3470 X8.485 Y-36.348
 N3480 X9.021 Y-37.017
 N3490 G3 X10.696 Y-36.568 I0. JO.
 N3500 G1 X10.826 Y-35.722
 N3510 X10.903 Y-34.901
 N3520 X10.927 Y-34.059
 N3530 X10.895 Y-33.213
 N3540 X10.806 Y-32.382
 N3550 G2 X11.238 Y-31.665 I11.459 J-32.287
 N3560 G3 X11.745 Y-31.48 I0. JO.
 N3570 G2 X12.538 Y-31.752 I11.976 J-32.099
 N3580 G1 X13.002 Y-32.445
 N3590 X13.521 Y-33.113
 N3600 X14.081 Y-33.742
 N3610 X14.668 Y-34.323
 N3620 X15.311 Y-34.888
 N3630 G3 X16.884 Y-34.155 I0. JO.
 N3640 G1 X16.864 Y-33.3
 N3650 X16.797 Y-32.477
 N3660 X16.676 Y-31.644
 N3670 X16.497 Y-30.817
 N3680 X16.264 Y-30.014
 N3690 G2 X16.565 Y-29.233 I16.891 J-29.807
 N3700 G3 X17.034 Y-28.962 I0. JO.
 N3710 G2 X17.861 Y-29.092 I17.368 J-29.531
 N3720 G1 X18.438 Y-29.694
 N3730 X19.065 Y-30.262
 N3740 X19.726 Y-30.785
 N3750 X20.406 Y-31.254
 N3760 X21.137 Y-31.699
 N3770 G3 X22.558 Y-30.704 I0. JO.
 N3780 G1 X22.39 Y-29.865
 N3790 X22.182 Y-29.067
 N3800 X21.917 Y-28.268
 N3810 X21.598 Y-27.484
 N3820 X21.229 Y-26.734
 N3830 G2 X21.39 Y-25.912 I21.81 J-26.421
 N3840 G3 X21.804 Y-25.564 I0. JO.
 N3850 G2 X22.641 Y-25.549 I22.232 J-26.067
 N3860 G1 X23.315 Y-26.041
 N3870 X24.031 Y-26.492
 N3880 X24.772 Y-26.891
 N3890 X25.523 Y-27.236
 N3900 X26.32 Y-27.547
 N3910 G3 X27.547 Y-26.32 I0. JO.
 N3920 G1 X27.236 Y-25.523
 N3930 X26.892 Y-24.774
 N3940 X26.493 Y-24.033

N1390 G3 X-27.547 Y26.32 IO. JO.
N1400 G1 X-27.236 Y25.523
N1410 X-26.892 Y24.774
N1420 X-26.493 Y24.033
N1430 X-26.042 Y23.316
N1440 X-25.549 Y22.641
N1450 G2 X-25.564 Y21.804 I-26.067 J22.232
N1460 G3 X-25.912 Y21.39 IO. JO.
N1470 G2 X-26.734 Y21.229 I-26.421 J21.81
N1480 G1 X-27.482 Y21.597
N1490 X-28.266 Y21.916
N1500 X-29.065 Y22.181
N1510 X-29.865 Y22.39
N1520 X-30.704 Y22.558
N1530 G3 X-31.699 Y21.137 IO. JO.
N1540 G1 X-31.255 Y20.406
N1550 X-30.786 Y19.727
N1560 X-30.264 Y19.067
N1570 X-29.695 Y18.44
N1580 X-29.092 Y17.861
N1590 G2 X-28.963 Y17.033 I-29.531 J17.368
N1600 G3 X-29.232 Y16.566 IO. JO.
N1610 G2 X-30.014 Y16.264 I-29.807 J16.891
N1620 G1 X-30.815 Y16.496
N1630 X-31.642 Y16.675
N1640 X-32.476 Y16.797
N1650 X-33.299 Y16.864
N1660 X-34.155 Y16.884
N1670 G3 X-34.888 Y15.311 IO. JO.
N1680 G1 X-34.323 Y14.669
N1690 X-33.743 Y14.082
N1700 X-33.115 Y13.522
N1710 X-32.446 Y13.003
N1720 X-31.752 Y12.538
N1730 G2 X-31.48 Y11.745 I-32.099 J11.976
N1740 G3 X-31.665 Y11.237 IO. JO.
N1750 G2 X-32.382 Y10.805 I-32.287 J11.459
N1760 G1 X-33.211 Y10.895
N1770 X-34.057 Y10.927
N1780 X-34.899 Y10.903
N1790 X-35.721 Y10.826
N1800 X-36.568 Y10.696
N1810 G3 X-37.017 Y9.021 IO. JO.
N1820 G1 X-36.349 Y8.486
N1830 X-35.676 Y8.008
N1840 X-34.96 Y7.566
N1850 X-34.211 Y7.171
N1860 X-33.447 Y6.833
N1870 G2 X-33.042 Y6.1 I-33.691 J6.22
N1880 G3 X-33.135 Y5.568 IO. JO.
N1890 G2 X-33.767 Y5.018 I-33.786 J5.678
N1900 G1 X-34.599 Y4.962
N1910 X-35.437 Y4.847
N1920 X-36.262 Y4.677
N1930 X-37.059 Y4.458
N1940 X-37.87 Y4.184
N1950 G3 X-38.021 Y2.456 IO. JO.
N1960 G1 X-37.27 Y2.045
N1970 X-36.525 Y1.692
N1980 X-35.743 Y1.381
N1990 X-34.937 Y1.122
N2000 X-34.125 Y0.922
N2010 G2 X-33.599 Y0.27 I-34.259 J0.275
N2020 G3 X-33.599 Y-0.27 IO. JO.

N3950 X26.042 Y-23.316
N3960 X25.549 Y-22.641
N3970 G2 X25.564 Y-21.804 I26.067 J-22.232
N3980 G3 X25.912 Y-21.39 IO. JO.
N3990 G2 X26.734 Y-21.229 I26.421 J-21.81
N4000 G1 X27.482 Y-21.597
N4010 X28.266 Y-21.916
N4020 X29.065 Y-22.181
N4030 X29.865 Y-22.39
N4040 X30.704 Y-22.558
N4050 G3 X31.699 Y-21.137 IO. JO.
N4060 G1 X31.255 Y-20.406
N4070 X30.786 Y-19.727
N4080 X30.264 Y-19.067
N4090 X29.695 Y-18.44
N4100 X29.092 Y-17.861
N4110 G2 X28.963 Y-17.033 I29.531 J-17.368
N4120 G3 X29.232 Y-16.566 IO. JO.
N4130 G2 X30.014 Y-16.264 I29.807 J-16.891
N4140 G1 X30.815 Y-16.496
N4150 X31.642 Y-16.675
N4160 X32.476 Y-16.797
N4170 X33.299 Y-16.864
N4180 X34.155 Y-16.884
N4190 G3 X34.888 Y-15.311 IO. JO.
N4200 G1 X34.323 Y-14.669
N4210 X33.743 Y-14.082
N4220 X33.115 Y-13.522
N4230 X32.446 Y-13.003
N4240 X31.752 Y-12.538
N4250 G2 X31.48 Y-11.745 I32.099 J-11.976
N4260 G3 X31.665 Y-11.237 IO. JO.
N4270 G2 X32.382 Y-10.805 I32.287 J-11.459
N4280 G1 X33.211 Y-10.895
N4290 X34.057 Y-10.927
N4300 X34.899 Y-10.903
N4310 X35.721 Y-10.826
N4320 X36.568 Y-10.696
N4330 G3 X37.017 Y-9.021 IO. JO.
N4340 G1 X36.349 Y-8.486
N4350 X35.676 Y-8.008
N4360 X34.96 Y-7.566
N4370 X34.211 Y-7.171
N4380 X33.447 Y-6.833
N4390 G2 X33.042 Y-6.1 I33.691 J-6.22
N4400 G3 X33.135 Y-5.568 IO. JO.
N4410 G2 X33.767 Y-5.018 I33.786 J-5.678
N4420 G1 X34.599 Y-4.962
N4430 X35.437 Y-4.847
N4440 X36.262 Y-4.677
N4450 X37.059 Y-4.458
N4460 X37.87 Y-4.184
N4470 G3 X38.021 Y-2.456 IO. JO.
N4480 G1 X37.27 Y-2.045
N4490 X36.525 Y-1.692
N4500 X35.743 Y-1.381
N4510 X34.937 Y-1.122
N4520 X34.125 Y-0.922
N4530 G2 X33.599 Y-0.27 I34.259 J-0.275
N4540 G3 X33.599 Y0.27 IO. JO.
N4550 G2 X34.125 Y0.922 I34.259 J0.275
N4560 G1 X34.935 Y1.121
N4570 X35.74 Y1.38
N4580 X36.523 Y1.691

N2030 G2 X-34.125 Y-0.922 I-34.259 J-0.275 N4590 X37.27 Y2.045
 N2040 G1 X-34.935 Y-1.121 N4600 X38.021 Y2.456
 N2050 X-35.74 Y-1.38 N4610 G3 X37.87 Y4.184 IO. JO.
 N2060 X-36.523 Y-1.691 N4620 G1 X37.059 Y4.458
 N2070 X-37.27 Y-2.045 N4630 X36.264 Y4.676
 N2080 X-38.021 Y-2.456 N4640 X35.439 Y4.847
 N2090 G3 X-37.87 Y-4.184 IO. JO. N4650 X34.601 Y4.962
 N2100 G1 X-37.059 Y-4.458 N4660 X33.767 Y5.018
 N2110 X-36.264 Y-4.676 N4670 G2 X33.135 Y5.568 I33.786 J5.678
 N2120 X-35.439 Y-4.847 N4680 G3 X33.042 Y6.101 IO. JO.
 N2130 X-34.601 Y-4.962 N4690 G2 X33.447 Y6.833 I33.691 J6.22
 N2140 X-33.767 Y-5.018 N4700 G1 X34.209 Y7.171
 N2150 G2 X-33.135 Y-5.568 I-33.786 J-5.678 N4710 X34.958 Y7.565
 N2160 G3 X-33.042 Y-6.101 IO. JO. N4720 X35.675 Y8.008
 N2170 G2 X-33.447 Y-6.833 I-33.691 J-6.22 N4730 X36.348 Y8.485
 N2180 G1 X-34.209 Y-7.171 N4740 X37.017 Y9.021
 N2190 X-34.958 Y-7.565 N4750 G3 X36.568 Y10.696 IO. JO.
 N2200 X-35.675 Y-8.008 N4760 G1 X35.722 Y10.826
 N2210 X-36.348 Y-8.485 N4770 X34.901 Y10.903
 N2220 X-37.017 Y-9.021 N4780 X34.059 Y10.927
 N2230 G3 X-36.568 Y-10.696 IO. JO. N4790 X33.213 Y10.895
 N2240 G1 X-35.722 Y-10.826 N4800 X32.382 Y10.806
 N2250 X-34.901 Y-10.903 N4810 G2 X31.665 Y11.238 I32.287 J11.459
 N2260 X-34.059 Y-10.927 N4820 G3 X31.48 Y11.745 IO. JO.
 N2270 X-33.213 Y-10.895 N4830 G2 X31.752 Y12.538 I32.099 J11.976
 N2280 X-32.382 Y-10.806 N4840 G1 X32.445 Y13.002
 N2290 G2 X-31.665 Y-11.238 I-32.287 J-11.459 N4850 X33.113 Y13.521
 N2300 G3 X-31.48 Y-11.745 IO. JO. N4860 X33.742 Y14.081
 N2310 G2 X-31.752 Y-12.538 I-32.099 J-11.976 N4870 X34.323 Y14.668
 N2320 G1 X-32.445 Y-13.002 N4880 X34.888 Y15.311
 N2330 X-33.113 Y-13.521 N4890 G3 X34.155 Y16.884 IO. JO.
 N2340 X-33.742 Y-14.081 N4900 G1 X33.3 Y16.864
 N2350 X-34.323 Y-14.668 N4910 X32.477 Y16.797
 N2360 X-34.888 Y-15.311 N4920 X31.644 Y16.676
 N2370 G3 X-34.155 Y-16.884 IO. JO. N4930 X30.817 Y16.497
 N2380 G1 X-33.3 Y-16.864 N4940 X30.014 Y16.264
 N2390 X-32.477 Y-16.797 N4950 G2 X29.233 Y16.565 I29.807 J16.891
 N2400 X-31.644 Y-16.676 N4960 G3 X28.962 Y17.034 IO. JO.
 N2410 X-30.817 Y-16.497 N4970 G2 X29.092 Y17.861 I29.531 J17.368
 N2420 X-30.014 Y-16.264 N4980 G1 X29.694 Y18.438
 N2430 G2 X-29.233 Y-16.565 I-29.807 J-16.891 N4990 X30.262 Y19.065
 N2440 G3 X-28.962 Y-17.034 IO. JO. N5000 X30.785 Y19.726
 N2450 G2 X-29.092 Y-17.861 I-29.531 J-17.368 N5010 X31.254 Y20.406
 N2460 G1 X-29.694 Y-18.438 N5020 X31.699 Y21.137
 N2470 X-30.262 Y-19.065 N5030 G3 X30.704 Y22.558 IO. JO.
 N2480 X-30.785 Y-19.726 N5040 G1 X29.865 Y22.39
 N2490 X-31.254 Y-20.406 N5050 X29.067 Y22.182
 N2500 X-31.699 Y-21.137 N5060 X28.268 Y21.917
 N2510 G3 X-30.704 Y-22.558 IO. JO. N5070 X27.484 Y21.598
 N2520 G1 X-29.865 Y-22.39 N5080 X26.734 Y21.229
 N2530 X-29.067 Y-22.182 N5090 G2 X25.912 Y21.39 I26.421 J21.81
 N2540 X-28.268 Y-21.917 N5100 G3 X25.564 Y21.804 IO. JO.
 N2550 X-27.484 Y-21.598 N5110 G2 X25.549 Y22.641 I26.067 J22.232
 N2560 X-26.734 Y-21.229 N5120 G1 X26.041 Y23.315
 N2570 G2 X-25.912 Y-21.39 I-26.421 J-21.81 N5130 X26.492 Y24.031
 N2580 G3 X-25.564 Y-21.804 IO. JO. N5140 X26.891 Y24.772
 N2590 G2 X-25.549 Y-22.641 I-26.067 J-22.232 N5150 X27.236 Y25.523
 N5160 X27.524 Y26.261
 N5170 G77 H8
 N9998 G77 H9
 N9999 M2

Z40



%110
 N10 G90 (Mode Absolu)
 N20 G0 Z0.
 N30 G0 X0.360 Y-0.100
 N40 G77 H3
 N50 G77 H4
 N60 G1 X2.258 F3000
 N70 G2 X2.26 Y0. I0. J0.
 N80 G77 H8
 N90 G0 X22.818 Y24.181

N2480 G2 X-19.753 Y-20.686 I-20.148 J-20.432
 N2490 G1 X-20.145 Y-21.358
 N2500 X-20.495 Y-22.079
 N2510 X-20.786 Y-22.813
 N2520 X-21.031 Y-23.585
 N2530 G3 X-20.004 Y-24.462 I0. J0.
 N2540 G1 X-19.279 Y-24.097
 N2550 X-18.598 Y-23.695
 N2560 X-17.941 Y-23.236

N100 G77 H3
N110 G77 H4
N120 G1 X20.942 Y23.664 F3000
N130 G3 X20.004 Y24.462 I0. J0.
N140 G1 X19.279 Y24.097
N150 X18.598 Y23.695
N160 X17.941 Y23.236
N170 X17.341 Y22.746
N180 G2 X16.75 Y22.718 I17.028 J23.096
N190 G3 X16.429 Y22.951 I0. J0.
N200 G2 X16.274 Y23.521 I16.704 J23.332
N210 G1 X16.556 Y24.246
N220 X16.789 Y25.014
N230 X16.961 Y25.784
N240 X17.083 Y26.584
N250 G3 X15.931 Y27.29 I0. J0.
N260 G1 X15.272 Y26.817
N270 X14.662 Y26.313
N280 X14.085 Y25.757
N290 X13.569 Y25.178
N300 G2 X12.988 Y25.059 I13.205 J25.476
N310 G3 X12.639 Y25.237 I0. J0.
N320 G2 X12.394 Y25.777 I12.848 J25.658
N330 G1 X12.56 Y26.538
N340 X12.669 Y27.332
N350 X12.719 Y28.12
N360 X12.714 Y28.93
N370 G3 X11.466 Y29.446 I0. J0.
N380 G1 X10.889 Y28.876
N390 X10.366 Y28.282
N400 X9.882 Y27.643
N410 X9.464 Y26.991
N420 G2 X8.908 Y26.782 I9.058 J27.228
N430 G3 X8.534 Y26.904 I0. J0.
N440 G2 X8.209 Y27.399 I8.676 J27.352
N450 G1 X8.254 Y28.176
N460 X8.238 Y28.977
N470 X8.163 Y29.763
N480 X8.032 Y30.562
N490 G3 X6.719 Y30.877 I0. J0.
N500 G1 X6.238 Y30.223
N510 X5.814 Y29.556
N520 X5.436 Y28.849
N530 X5.125 Y28.139
N540 G2 X4.609 Y27.846 I4.687 J28.31
N550 G3 X4.221 Y27.908 I0. J0.
N560 G2 X3.822 Y28.346 I4.291 J28.372
N570 G1 X3.744 Y29.12
N580 X3.603 Y29.909
N590 X3.407 Y30.674
N600 X3.152 Y31.442
N610 G3 X1.806 Y31.548 I0. J0.
N620 G1 X1.433 Y30.827
N630 X1.119 Y30.101
N640 X0.856 Y29.344
N650 X0.66 Y28.595
N660 G2 X0.197 Y28.224 I0.2 J28.694
N670 G3 X0.197 Y28.224 I0. J0.
N680 G2 X0.66 Y28.595 I0.2 J28.694
N690 G1 X0.857 Y29.347
N700 X-1.12 Y30.105
N710 X-1.434 Y30.829
N2570 X-17.341 Y-22.746
N2580 G2 X-16.75 Y-22.718 I-17.028 J-23.096
N2590 G3 X-16.429 Y-22.951 I0. J0.
N2600 G2 X-16.274 Y-23.521 I-16.704 J-23.332
N2610 G1 X-16.556 Y-24.246
N2620 X-16.789 Y-25.014
N2630 X-16.961 Y-25.784
N2640 X-17.083 Y-26.584
N2650 G3 X-15.931 Y-27.29 I0. J0.
N2660 G1 X-15.272 Y-26.817
N2670 X-14.662 Y-26.313
N2680 X-14.085 Y-25.757
N2690 X-13.569 Y-25.178
N2700 G2 X-12.988 Y-25.059 I-13.205 J-25.476
N2710 G3 X-12.639 Y-25.237 I0. J0.
N2720 G2 X-12.394 Y-25.777 I-12.848 J-25.658
N2730 G1 X-12.56 Y-26.538
N2740 X-12.669 Y-27.332
N2750 X-12.719 Y-28.12
N2760 X-12.714 Y-28.93
N2770 G3 X-11.466 Y-29.446 I0. J0.
N2780 G1 X-10.889 Y-28.876
N2790 X-10.366 Y-28.282
N2800 X-9.882 Y-27.643
N2810 X-9.464 Y-26.991
N2820 G2 X-8.908 Y-26.782 I-9.058 J-27.228
N2830 G3 X-8.534 Y-26.904 I0. J0.
N2840 G2 X-8.209 Y-27.399 I-8.676 J-27.352
N2850 G1 X-8.254 Y-28.176
N2860 X-8.238 Y-28.977
N2870 X-8.163 Y-29.763
N2880 X-8.032 Y-30.562
N2890 G3 X-6.719 Y-30.877 I0. J0.
N2900 G1 X-6.238 Y-30.223
N2910 X-5.814 Y-29.556
N2920 X-5.436 Y-28.849
N2930 X-5.125 Y-28.139
N2940 G2 X-4.609 Y-27.846 I-4.687 J-28.31
N2950 G3 X-4.221 Y-27.908 I0. J0.
N2960 G2 X-3.822 Y-28.346 I-4.291 J-28.372
N2970 G1 X-3.744 Y-29.12
N2980 X-3.603 Y-29.909
N2990 X-3.407 Y-30.674
N3000 X-3.152 Y-31.442
N3010 G3 X-1.806 Y-31.548 I0. J0.
N3020 G1 X-1.433 Y-30.827
N3030 X-1.119 Y-30.101
N3040 X-0.856 Y-29.344
N3050 X-0.66 Y-28.595
N3060 G2 X-0.197 Y-28.224 I-0.2 J-28.694
N3070 G3 X0.197 Y-28.224 I0. J0.
N3080 G2 X0.66 Y-28.595 I0.2 J-28.694
N3090 G1 X0.857 Y-29.347
N3100 X1.12 Y-30.105
N3110 X1.434 Y-30.829
N3120 X1.806 Y-31.548
N3130 G3 X3.152 Y-31.442 I0. J0.
N3140 G1 X3.407 Y-30.672
N3150 X3.604 Y-29.906

N720 X-1.806 Y31.548
N730 G3 X-3.152 Y31.442 IO. JO.
N740 G1 X-3.407 Y30.672
N750 X-3.604 Y29.906
N760 X-3.745 Y29.117
N770 X-3.822 Y28.346
N780 G2 X-4.221 Y27.908 I-4.291 J28.372
N790 G3 X-4.611 Y27.846 IO. JO.
N800 G2 X-5.125 Y28.139 I-4.687 J28.31
N810 G1 X-5.438 Y28.852
N820 X-5.816 Y29.559
N830 X-6.239 Y30.225
N840 X-6.719 Y30.877
N850 G3 X-8.032 Y30.562 IO. JO.
N860 G1 X-8.163 Y29.761
N870 X-8.238 Y28.974
N880 X-8.253 Y28.172
N890 X-8.209 Y27.399
N900 G2 X-8.535 Y26.904 I-8.676 J27.352
N910 G3 X-8.91 Y26.782 IO. JO.
N920 G2 X-9.464 Y26.991 I-9.058 J27.228
N930 G1 X-9.884 Y27.646
N940 X-10.368 Y28.285
N950 X-10.89 Y28.877
N960 X-11.466 Y29.446
N970 G3 X-12.714 Y28.93 IO. JO.
N980 G1 X-12.719 Y28.118
N990 X-12.669 Y27.328
N1000 X-12.559 Y26.534
N1010 X-12.394 Y25.777
N1020 G2 X-12.639 Y25.237 I-12.848 J25.658
N1030 G3 X-12.988 Y25.059 IO. JO.
N1040 G2 X-13.569 Y25.179 I-13.205 J25.476
N1050 G1 X-14.087 Y25.759
N1060 X-14.665 Y26.315
N1070 X-15.274 Y26.818
N1080 X-15.931 Y27.29
N1090 G3 X-17.083 Y26.584 IO. JO.
N1100 G1 X-16.961 Y25.782
N1110 X-16.788 Y25.01
N1120 X-16.555 Y24.243
N1130 X-16.274 Y23.521
N1140 G2 X-16.429 Y22.951 I-16.704 J23.332
N1150 G3 X-16.749 Y22.719 IO. JO.
N1160 G2 X-17.341 Y22.746 I-17.028 J23.096
N1170 G1 X-17.943 Y23.239
N1180 X-18.601 Y23.697
N1190 X-19.281 Y24.098
N1200 X-20.004 Y24.462
N1210 G3 X-21.031 Y23.585 IO. JO.
N1220 G1 X-20.785 Y22.811
N1230 X-20.494 Y22.076
N1240 X-20.144 Y21.355
N1250 X-19.753 Y20.686
N1260 G2 X-19.818 Y20.097 I-20.148 J20.432
N1270 G3 X-20.097 Y19.818 IO. JO.
N1280 G2 X-20.686 Y19.753 I-20.432 J20.148
N1290 G1 X-21.358 Y20.145
N1300 X-22.079 Y20.495
N1310 X-22.813 Y20.786
N1320 X-23.585 Y21.031
N1330 G3 X-24.462 Y20.004 IO. JO.
N3160 X3.745 Y-29.117
N3170 X3.822 Y-28.346
N3180 G2 X4.221 Y-27.908 I4.291 J-28.372
N3190 G3 X4.611 Y-27.846 IO. JO.
N3200 G2 X5.125 Y-28.139 I4.687 J-28.31
N3210 G1 X5.438 Y-28.852
N3220 X5.816 Y-29.559
N3230 X6.239 Y-30.225
N3240 X6.719 Y-30.877
N3250 G3 X8.032 Y-30.562 IO. JO.
N3260 G1 X8.163 Y-29.761
N3270 X8.238 Y-28.974
N3280 X8.253 Y-28.172
N3290 X8.209 Y-27.399
N3300 G2 X8.535 Y-26.904 I8.676 J-27.352
N3310 G3 X8.91 Y-26.782 IO. JO.
N3320 G2 X9.464 Y-26.991 I9.058 J-27.228
N3330 G1 X9.884 Y-27.646
N3340 X10.368 Y-28.285
N3350 X10.89 Y-28.877
N3360 X11.466 Y-29.446
N3370 G3 X12.714 Y-28.93 IO. JO.
N3380 G1 X12.719 Y-28.118
N3390 X12.669 Y-27.328
N3400 X12.559 Y-26.534
N3410 X12.394 Y-25.777
N3420 G2 X12.639 Y-25.237 I12.848 J-25.658
N3430 G3 X12.988 Y-25.059 IO. JO.
N3440 G2 X13.569 Y-25.179 I13.205 J-25.476
N3450 G1 X14.087 Y-25.759
N3460 X14.665 Y-26.315
N3470 X15.274 Y-26.818
N3480 X15.931 Y-27.29
N3490 G3 X17.083 Y-26.584 IO. JO.
N3500 G1 X16.961 Y-25.782
N3510 X16.788 Y-25.01
N3520 X16.555 Y-24.243
N3530 X16.274 Y-23.521
N3540 G2 X16.429 Y-22.951 I16.704 J-23.332
N3550 G3 X16.749 Y-22.719 IO. JO.
N3560 G2 X17.341 Y-22.746 I17.028 J-23.096
N3570 G1 X17.943 Y-23.239
N3580 X18.601 Y-23.697
N3590 X19.281 Y-24.098
N3600 X20.004 Y-24.462
N3610 G3 X21.031 Y-23.585 IO. JO.
N3620 G1 X20.785 Y-22.811
N3630 X20.494 Y-22.076
N3640 X20.144 Y-21.355
N3650 X19.753 Y-20.686
N3660 G2 X19.818 Y-20.097 I20.148 J-20.432
N3670 G3 X20.097 Y-19.818 IO. JO.
N3680 G2 X20.686 Y-19.753 I20.432 J-20.148
N3690 G1 X21.358 Y-20.145
N3700 X22.079 Y-20.495
N3710 X22.813 Y-20.786
N3720 X23.585 Y-21.031
N3730 G3 X24.462 Y-20.004 IO. JO.
N3740 G1 X24.097 Y-19.279
N3750 X23.695 Y-18.598
N3760 X23.236 Y-17.941
N3770 X22.746 Y-17.341

N1340 G1 X-24.097 Y19.279
N1350 X-23.695 Y18.598
N1360 X-23.236 Y17.941
N1370 X-22.746 Y17.341
N1380 G2 X-22.718 Y16.75 I-23.096 J17.028
N1390 G3 X-22.951 Y16.429 IO. JO.
N1400 G2 X-23.521 Y16.274 I-23.332 J16.704
N1410 G1 X-24.246 Y16.556
N1420 X-25.014 Y16.789
N1430 X-25.784 Y16.961
N1440 X-26.584 Y17.083
N1450 G3 X-27.29 Y15.931 IO. JO.
N1460 G1 X-26.817 Y15.272
N1470 X-26.313 Y14.662
N1480 X-25.757 Y14.085
N1490 X-25.178 Y13.569
N1500 G2 X-25.059 Y12.988 I-25.476 J13.205
N1510 G3 X-25.237 Y12.639 IO. JO.
N1520 G2 X-25.777 Y12.394 I-25.658 J12.848
N1530 G1 X-26.538 Y12.56
N1540 X-27.332 Y12.669
N1550 X-28.12 Y12.719
N1560 X-28.93 Y12.714
N1570 G3 X-29.446 Y11.466 IO. JO.
N1580 G1 X-28.876 Y10.889
N1590 X-28.282 Y10.366
N1600 X-27.643 Y9.882
N1610 X-26.991 Y9.464
N1620 G2 X-26.782 Y8.908 I-27.228 J9.058
N1630 G3 X-26.904 Y8.534 IO. JO.
N1640 G2 X-27.399 Y8.209 I-27.352 J8.676
N1650 G1 X-28.176 Y8.254
N1660 X-28.977 Y8.238
N1670 X-29.763 Y8.163
N1680 X-30.562 Y8.032
N1690 G3 X-30.877 Y6.719 IO. JO.
N1700 G1 X-30.223 Y6.238
N1710 X-29.556 Y5.814
N1720 X-28.849 Y5.436
N1730 X-28.139 Y5.125
N1740 G2 X-27.846 Y4.609 I-28.31 J4.687
N1750 G3 X-27.908 Y4.221 IO. JO.
N1760 G2 X-28.346 Y3.822 I-28.372 J4.291
N1770 G1 X-29.12 Y3.744
N1780 X-29.909 Y3.603
N1790 X-30.674 Y3.407
N1800 X-31.442 Y3.152
N1810 G3 X-31.548 Y1.806 IO. JO.
N1820 G1 X-30.827 Y1.433
N1830 X-30.101 Y1.119
N1840 X-29.344 Y0.856
N1850 X-28.595 Y0.66
N1860 G2 X-28.224 Y0.197 I-28.694 J0.2
N1870 G3 X-28.224 Y0.197 IO. JO.
N1880 G2 X-28.595 Y0.66 I-28.694 J-0.2
N1890 G1 X-29.347 Y-0.857
N1900 X-30.105 Y-1.12
N1910 X-30.829 Y-1.434
N1920 X-31.548 Y-1.806
N1930 G3 X-31.442 Y-3.152 IO. JO.
N1940 G1 X-30.672 Y-3.407
N1950 X-29.906 Y-3.604
N3780 G2 X22.718 Y-16.75 I23.096 J-17.028
N3790 G3 X22.951 Y-16.429 IO. JO.
N3800 G2 X23.521 Y-16.274 I23.332 J-16.704
N3810 G1 X24.246 Y-16.556
N3820 X25.014 Y-16.789
N3830 X25.784 Y-16.961
N3840 X26.584 Y-17.083
N3850 G3 X27.29 Y-15.931 IO. JO.
N3860 G1 X26.817 Y-15.272
N3870 X26.313 Y-14.662
N3880 X25.757 Y-14.085
N3890 X25.178 Y-13.569
N3900 G2 X25.059 Y-12.988 I25.476 J-13.205
N3910 G3 X25.237 Y-12.639 IO. JO.
N3920 G2 X25.777 Y-12.394 I25.658 J-12.848
N3930 G1 X26.538 Y-12.56
N3940 X27.332 Y-12.669
N3950 X28.12 Y-12.719
N3960 X28.93 Y-12.714
N3970 G3 X29.446 Y-11.466 IO. JO.
N3980 G1 X28.876 Y-10.889
N3990 X28.282 Y-10.366
N4000 X27.643 Y-9.882
N4010 X26.991 Y-9.464
N4020 G2 X26.782 Y-8.908 I27.228 J-9.058
N4030 G3 X26.904 Y-8.534 IO. JO.
N4040 G2 X27.399 Y-8.209 I27.352 J-8.676
N4050 G1 X28.176 Y-8.254
N4060 X28.977 Y-8.238
N4070 X29.763 Y-8.163
N4080 X30.562 Y-8.032
N4090 G3 X30.877 Y-6.719 IO. JO.
N4100 G1 X30.223 Y-6.238
N4110 X29.556 Y-5.814
N4120 X28.849 Y-5.436
N4130 X28.139 Y-5.125
N4140 G2 X27.846 Y-4.609 I28.31 J-4.687
N4150 G3 X27.908 Y-4.221 IO. JO.
N4160 G2 X28.346 Y-3.822 I28.372 J-4.291
N4170 G1 X29.12 Y-3.744
N4180 X29.909 Y-3.603
N4190 X30.674 Y-3.407
N4200 X31.442 Y-3.152
N4210 G3 X31.548 Y-1.806 IO. JO.
N4220 G1 X30.827 Y-1.433
N4230 X30.101 Y-1.119
N4240 X29.344 Y-0.856
N4250 X28.595 Y-0.66
N4260 G2 X28.224 Y-0.197 I28.694 J-0.2
N4270 G3 X28.224 Y0.197 IO. JO.
N4280 G2 X28.595 Y0.66 I28.694 J0.2
N4290 G1 X29.347 Y0.857
N4300 X30.105 Y1.12
N4310 X30.829 Y1.434
N4320 X31.548 Y1.806
N4330 G3 X31.442 Y3.152 IO. JO.
N4340 G1 X30.672 Y3.407
N4350 X29.906 Y3.604
N4360 X29.117 Y3.745
N4370 X28.346 Y3.822
N4380 G2 X27.908 Y4.221 I28.372 J4.291
N4390 G3 X27.846 Y4.611 IO. JO.

N1960 X-29.117 Y-3.745
N1970 X-28.346 Y-3.822
N1980 G2 X-27.908 Y-4.221 I-28.372 J-4.291
N1990 G3 X-27.846 Y-4.611 IO. JO.
N2000 G2 X-28.139 Y-5.125 I-28.31 J-4.687
N2010 G1 X-28.852 Y-5.438
N2020 X-29.559 Y-5.816
N2030 X-30.225 Y-6.239
N2040 X-30.877 Y-6.719
N2050 G3 X-30.562 Y-8.032 IO. JO.
N2060 G1 X-29.761 Y-8.163
N2070 X-28.974 Y-8.238
N2080 X-28.172 Y-8.253
N2090 X-27.399 Y-8.209
N2100 G2 X-26.904 Y-8.535 I-27.352 J-8.676
N2110 G3 X-26.782 Y-8.91 IO. JO.
N2120 G2 X-26.991 Y-9.464 I-27.228 J-9.058
N2130 G1 X-27.646 Y-9.884
N2140 X-28.285 Y-10.368
N2150 X-28.877 Y-10.89
N2160 X-29.446 Y-11.466
N2170 G3 X-28.93 Y-12.714 IO. JO.
N2180 G1 X-28.118 Y-12.719
N2190 X-27.328 Y-12.669
N2200 X-26.534 Y-12.559
N2210 X-25.777 Y-12.394
N2220 G2 X-25.237 Y-12.639 I-25.658 J-12.848
N2230 G3 X-25.059 Y-12.988 IO. JO.
N2240 G2 X-25.179 Y-13.569 I-25.476 J-13.205
N2250 G1 X-25.759 Y-14.087
N2260 X-26.315 Y-14.665
N2270 X-26.818 Y-15.274
N2280 X-27.29 Y-15.931
N2290 G3 X-26.584 Y-17.083 IO. JO.
N2300 G1 X-25.782 Y-16.961
N2310 X-25.01 Y-16.788
N2320 X-24.243 Y-16.555
N2330 X-23.521 Y-16.274
N2340 G2 X-22.951 Y-16.429 I-23.332 J-16.704
N2350 G3 X-22.719 Y-16.749 IO. JO.
N2360 G2 X-22.746 Y-17.341 I-23.096 J-17.028
N2370 G1 X-23.239 Y-17.943
N2380 X-23.697 Y-18.601
N2390 X-24.098 Y-19.281
N2400 X-24.462 Y-20.004
N2410 G3 X-23.585 Y-21.031 IO. JO.
N2420 G1 X-22.811 Y-20.785
N2430 X-22.076 Y-20.494
N2440 X-21.355 Y-20.144
N2450 X-20.686 Y-19.753
N2460 G2 X-20.097 Y-19.818 I-20.432 J-20.148
N2470 G3 X-19.818 Y-20.097 IO. JO.
N4400 G2 X28.139 Y5.125 I28.31 J4.687
N4410 G1 X28.852 Y5.438
N4420 X29.559 Y5.816
N4430 X30.225 Y6.239
N4440 X30.877 Y6.719
N4450 G3 X30.562 Y8.032 IO. JO.
N4460 G1 X29.761 Y8.163
N4470 X28.974 Y8.238
N4480 X28.172 Y8.253
N4490 X27.399 Y8.209
N4500 G2 X26.904 Y8.535 I27.352 J8.676
N4510 G3 X26.782 Y8.91 IO. JO.
N4520 G2 X26.991 Y9.464 I27.228 J9.058
N4530 G1 X27.646 Y9.884
N4540 X28.285 Y10.368
N4550 X28.877 Y10.89
N4560 X29.446 Y11.466
N4570 G3 X28.93 Y12.714 IO. JO.
N4580 G1 X28.118 Y12.719
N4590 X27.328 Y12.669
N4600 X26.534 Y12.559
N4610 X25.777 Y12.394
N4620 G2 X25.237 Y12.639 I25.658 J12.848
N4630 G3 X25.059 Y12.988 IO. JO.
N4640 G2 X25.179 Y13.569 I25.476 J13.205
N4650 G1 X25.759 Y14.087
N4660 X26.315 Y14.665
N4670 X26.818 Y15.274
N4680 X27.29 Y15.931
N4690 G3 X26.584 Y17.083 IO. JO.
N4700 G1 X25.782 Y16.961
N4710 X25.01 Y16.788
N4720 X24.243 Y16.555
N4730 X23.521 Y16.274
N4740 G2 X22.951 Y16.429 I23.332 J16.704
N4750 G3 X22.719 Y16.749 IO. JO.
N4760 G2 X22.746 Y17.341 I23.096 J17.028
N4770 G1 X23.239 Y17.943
N4780 X23.697 Y18.601
N4790 X24.098 Y19.281
N4800 X24.462 Y20.004
N4810 G3 X23.585 Y21.031 IO. JO.
N4820 G1 X22.811 Y20.785
N4830 X22.076 Y20.494
N4840 X21.355 Y20.144
N4850 X20.686 Y19.753
N4860 G2 X20.097 Y19.818 I20.432 J20.148
N4870 G3 X19.818 Y20.097 IO. JO.
N4880 G2 X19.753 Y20.686 I20.148 J20.432
N4890 G1 X20.145 Y21.358
N4900 X20.495 Y22.079
N4910 X20.786 Y22.813
N4920 X21.012 Y23.523
N4930 G77 H8
N9998 G77 H9
N9999 M2

BIBLIOGRAFIE

- [A1] **Achimescu, N., Popovici, V.** *Studiul procesului de formare a geometriei tăieturii la debitarea cu laser a materialelor nemetalice organice, Conferința Națională "Realizări și perspective în domeniul laserilor și aplicațiilor lor în știință și tehnologie", Timișoara, 1991, p. 199-205*
- [A2] **Alexis, J.** *Metoda Taguchi în practica industrială, Editura Tehnica, București, 1999*
- [A3] **Atițoaiei, V., Mocuța, G., E., Argeșanu, V., Nicoară, I., ș.a.** *Optoelectronică - Materiale. Componente. Aplicații., Editura Eurostampa, Timișoara, 1999*
- [B1] **Basov, G.M., Belanov, M.E.** *Kvant. Electr., 3, 1971*
- [B2] **Bass, M., ș.a.,** *Handbook of Optics, Fundamentals, Techniques, Design, vol.I, II, McGraw-Hill, New York, 1995*
- [B3] **Batanov, V.A., Bunkin, F.V., Prokhorov, A.M., Fedorov, V.B.** *JETF, 11, 1970*
- [B4] **Baudouin, P., Belhadj, A., Breaban, F., Deffontaine, A., Houbaert, Y.** *Effects of laser and mechanical cutting modes on the magnetic properties of low and medium Si content nonoriented electrical steels, pag 3213- 3215, Volume 38, issue 5, part 1, 2002*
- [B5] **Belforte, D., Levitt, M.** *The industrial laser annual handbook, PennWell Books – Tulsa, Oklahoma USA, 1990*
- [B6] **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*
- [B7] **Bounds, M., ș.a.** *Beyond Total Quality Management Toward the Emerging Paradigm – McGraw-Hill International Editions, NY, USA, 1994*
- [B8] **Bravener, L.C.** *QFD: The Proper Tool for the Job – The English International Congress on CIM Database, 1992*
- [B9] **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, pag. 77 – 89, 2001, SUA*
- [B10] **Brice, J.C., Cole, A.M.** *Proceedings Annual Symp. Freq. Control, 32 - 1, 1979*
- [B11] **Broh, R.A.** *Managing Quality for Higher Profits – McGraw-Hill, NY, USA, 1982*
- [C1] **Carlslaw, H.S., Jaeger, J.C.** *Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, London, N.Y., 1959*
- [C2] **Chang, R.Y.** *Continuous process improvement, Kogan Press, London, 1995*
- [C3] **Chen, H.H., Liu, C.S.** *Phys. Rev. Lett., 39, 1977*
- [C4] **Cicală, E.** *Stabilirea prin analiză dispersională a semnificației culorii plexiglasului asupra geometriei tăieturilor executate cu laser CO₂, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, TCM, 1996, p. 163-168*
- [C5] **Cicală, E., 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, p. 145-152*

- [C6] **Cicală, E., Nichici, A., Vannes, A., B., Grevey, D., Jacrot, G.** *La methode des plans d'experiences appliquee a l'optimisation du decoupage par lasers*, Seminaire europeen "LASERAP'3" Ecole CNRS, Club Laser et Procedes, Sarlat, France, 1997, p. 383-390
- [C7] **Cicală, E., Zsivanov, D.** *Ierarhizarea factorilor de influență semnificativi asupra lățimii tăieturilor realizate cu laser CO₂*, Buletinul Științific al Universității "POLITEHNICA" Timișoara, seria Mecanică, Timișoara, Tom 41(55), 1996, Fascicola 1, p. 154-161
- [C8] **Clausing, D.** *Product Development, Robust Design and Education* – 4th Annual Total Product Development Symposium, ASI, 1998
- [C9] **Crețu, E.** *Sisteme optoelectronice de vedere pe timp de noapte*, Editura A.T.M., București, 1999
- [C10] **Crețu, E.** *Calculu și construcția aparatului optoelectronice*, Editura A.T.M., București, 2001
- [C11] **Crețu, E.** *Transmiterea radiației laser prin sistemele optice artileristice*, Teză de Doctorat, București, 1986
- [C12] **Crosby, P.B.** *Quality is Free* – McGraw-Hill Book Company, NY, USA, 1979
- [C13] **Cross, N., Clausing, D.** *Total Quality Development* – MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994
- [C14] **Cros, J., F.** *La mesure de rugosite*, Dossier Mesures, pag. 7-19, 1984
- [C15] **Cross, N., ș.a.** *Engineering Design Methods* – John Wiley & Sons, Chichester, 1994
- [C16] **Csibi, V., I., Popa, M., Mândru, D., Mătieș, V.** *Mașini și instalații de prelucrat în mecanică fină*, Editura Gloria, 2000
- [D1] **Dabby, F.W., Pack, U.C.** *IEEEJ. Quant. Electron.*, QE-8, 1972
- [D2] **Dagnall, H.** *Exploring surface texture*, Rank Taylor Hobson, Leicester, England, 1980
- [D3] **Daniel, D., Caplain, R.** *Methodes usuelles de caracterisation des surfaces*, Societe francaise de metallurgie, Eyrolles, France, 1988
- [D4] **Diamond, W.J.** *Practical Experiment Designs* – Lifetime Learning Publications, Belmont, CA, USA, 1981
- [D5] **Donțu, O.** *Tehnologii de prelucrare cu laser*, Ed. Tehnică, București, 1985
- [D6] **Duley, W.W.** *CO₂ Laser. Effects and Applications*, Academic Press, N.Y., San Francisco, London, 1976
- [D7] **Duley, W.W.** *Laser Processing and Analysis of Materials*, Plenum Press, N.Y., London, 1982
- [D8] **Dumitraș, D.** *Laseri cu gaz*, Editura Academiei, București, 1982
- [D9] **Duțu, C., A., D.** *Laserul - Lumina de mîine*, Editura Albatros, București, 1981
- [E1] **Ealey, L.A.** *Les méthodes Taguchi dans l'industrie occidentale* – Les Editions D'Organisation, Paris, 1990
- [F1] **Feigenbaum, A.V.** *Total quality control* – Third Edition, McGraw-Hill, New-York, 1983
- [F2] **Fowlkers, W.Y., Creveling, C.M.** *Engineering Methods for Robust Production Design Using Taguchi Methods în Technology and Product* – Addison-Wesley, 1997
- [G1] **Gruescu, C.,** *Elemente de optică tehnică și aparate optice*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- [G2] **Gruescu, C.,** *Shape and spherical aberration of a single lens*, The 8.th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmissions with international participation, Timișoara, p.149-152, 2000
- [G3] **Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I.,** *Image Quality Optimization of an Achromatic Doublet Using Defocusing and Methods Based on OPD*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003 ISSN 1453-0600
- [G4] **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

- [G5] **Gruescu, C., Dumache, C., Nicoară, I., Ionescu, C., Gugoasă, A.** *Menținerea nivelului de calitate al aparatelor optice fabricate în serie mică*, Buletinul Științific al Universității "POLITEHNICA" Timișoara, seria Management. a Inginerie Economică. Ingineria Transporturilor., Editura Politehnica, Timișoara, Tom 52(66), 2007, Fascicola 2, ISSN 1224-6050
- [G6] **Gruescu, C. M.; Ionescu, C., Nicoara, I., Breaban, F.** *Increase of precision and efficiency of laser cutting by means of optical system optimization*, DAAAM Baltic, Manufacturing Engineering, Tallinn, Estonia, 2008
- [G7] **Gruescu, C., Nicoară, I., Costache, M., Ionescu, C., Han, A.** *Metoda Ray Tracing în optica imaging și non-imaging*, Editura Politehnica, Timișoara, 2008
- [H1] **Han, A.** *High performance laser system*, Revista de tehnologii neconvenționale, nr. 2, pag. 141 – 146, 2005
- [H2] **Hecht, E.** *Optics 3rd ed.*, Eddison Wesley Longman, Inc., NY, 1998
- [H3] **Hecht, J.** *The Laser Guidebook (second edition)*, McGraw-Hill, New York, 1992
- [H4] **Hecht, J.** *Understanding Lasers (second edition)*, IEEE Press, New York, 1994
- [H5] **Hitz, C. B., Ewing, J. J. and Hecht, J.** *Understanding Laser Technology*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 2000
- [H6] **Huțanu, G.** *De la optica clasică la optica modernă*, Editura Stiințifică și Enciclopedică, București, 1984
- [I1] **Ionescu, C., Pugna, A., Nicoară, 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. a Inginerie Economică. Ingineria Transporturilor., Editura Politehnica, Timișoara, Tom 52(66), 2007, Fascicola 1, ISSN 1224-6050
- [I2] **Ionescu, C., Nicoară, 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, ISSN 1221-5279
- [J1] **Julean, A.** *Contribuții la studiul fenomenelor specifice în procesele tehnologice de prelucrare cu laser*, Teză de Doctorat, București, 2006
- [K1] **Kingslake, R.** *Lens design fundamentals*, Academic Press, N.Y., 1978
- [K2] **Koo, J.C., Slusher, R.E.** *Appl. Phys. Lett.*, 1976
- [L1] **Lifenson, M.N., Pudkov, S.D.** *JTF*, 1977
- [M2] **Mîrzu, M., Crețu, E., Nicoară, I.** *Optica ondulatorie și fourier*, Academia Tehnică Militară, Protransilvania, Bucureșt, 1996
- [M2] **McKay, J.A., Schriempf, J.T.** *Appl. Phys. Lett.*, 1979
- [N1] **Naumann, A., Schroder, G.** *Bauelemente der Optik. Taschenbuch der technischen Optik*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
- [N2] **Nichici, A., 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, p. 446-453, 1998
- [N3] **Nicoară, I.** *Calculul și construcția aparatelor optice*, vol.I, II, Lito I.P.T., 1987
- [N4] **Nicoară, I., ș.a.** *Calculul și construcția aparatelor optice*, Îndrumător de proiectare, Lito IPTVT, 1984
- [N5] **Nicoară, I., Gruescu, C., Ațițoaiei, V., Duma, V.** *Aparate optice*, vol I, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- [N6] **Nicoară, I., Gruescu, C., Sticlaru, C.** *Fiabilitate și terotehnică*, Editura Politehnica, Timișoara, 2006

- [O1] **O'Shea, D.C.**, *Elements of Modern Optical Design*, John Wiley&Sons, New York, 1985
- [P1] **Palmer, J.R., Bennett, H.E.**, *Proc. 13 Ann. Symp. on Optical Materials for High Power Lasers*, Boulder, Colorado, 1981
- [P2] **Popescu, N., Opran, M.**, *Laseri. Aplicații.*, Editura Militară, București, 1979
- [P3] **Popovici, V.**, *Tehnologii în optica laser*, Editura Mirton, Timișoara, 1995
- [P4] **Popovici, V., Nicoară, I.**, *Sisteme optice laser*, Editura Mirton, Timișoara, 1998
- [P5] **Porteus, J.O., Decker, D.L., Faith, W.N., Grandjean, D.J., Seitel, S.C., Soilean, M.J. Pugna, A.**, *Cercetări privind proiectarea robustă – Taguchi a procesului de creștere prin metoda hidrotermală a monocristalelor de a – cuarț – Teză de Doctorat*, Timișoara, 2005
- [P6] **Pugna, A., Grozescu, I., Ștefănescu, W., Proștean, G.**, *Optimizing the hydrothermal growth process parameters of the a-quartz monocrystals using Taguchi's Robust Design –*, Virtual Design and Automation - New Trends in Collaborative Design, Poznan, Poland, Publishing House of Poznan University of Technology, pg. 327-336, 2006
- [P7] **Pugna, A., Grozescu, I., Drăghici, A.**, *Using Taguchi's Robust Design to improve the dimensional stability of the hydrothermally grown a-quartz monocrystals –*, Virtual Design and Automation - New Trends in Collaborative Design, Poznan, Poland, Publishing House of Poznan University of Technology, pg. 427-434, 2006
- [Q1] **Quenzer, A., Gerbert, D.**, *Optique et Photonique, 1*, 1997
- [R1] **Ready, J.F.**, *Effects of high Power Laser Radiation*, Academic Press, N.Y., 1971
- [S1] **Saito, T., Milam, D., Baker, P., Murphy, G.**, *NBS Spec. Publ. N 435*, 1975
- [S2] **Sari, S.O., Kohen, D.H., Scherkose, K.D.**, *Phys. Rev.*, 1980
- [S3] **Schröder, G.**, *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen*. Vogel Buchverlag Würzburg. 1990
- [S4] **Silfvast, W. T.**, *Laser Fundamentals*, Cambridge University Press, 1996
- [S5] **Sparks, M.**, *J. Appl. Phys.*, 47, 1976
- [S6] **Smith, W.J.**, *Modern Optical Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, NY, 2000
- [S7] **STAS 3003-79**, *Optica geometrică. Terminologie și simboluri*
- [S8] **Sterian, P., Stan., M., Svelto, O.**, *Fizica*, E.D.P., București, 1985
- [S9] **Svelto, O.**, *Principles of Lasers*, Plenum, New York, 1998
- [T1] **Taguchi, G.**, *Introduction to quality engineering. Designing quality into products and process*, Asian Productivity Organization, 1986
- [T2] **Taguchi, G., ș.a.**, *Robust Engineering* – McGraw-Hill, New York, 2000
- [T3] **Taguchi, G.**, *System of Experimental Design – Vol I & II*, Unipub/Kraus International Publications, White Plains, NY, USA, 1987
- [T4] **Taguchi, G.**, *Introduction to Quality Engineering* – Unipub/Kraus International Publications, White Plains, NY, USA, 1986
- [T5] **Taguchi, G., Wu, Y.**, *Introduction to off-line quality control* – Central Japan Quality Association, Nagoya, Japan, 1980
- [T6] **Taguchi, G., ș.a.**, *Quality Engineering in Production Systems* – McGraw-Hill, NY, USA, 1989
- [T7] **Taloi, D.**, *Optimizarea Proceselor Tehnologice*, Editura Academiei, București, 1987
- [T8] **Townes, C. H.**, *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*, Oxford University Press, New York, 1999
- [U1] **Ursu, I., Mihăilescu, I.N., Prokhorov, A.M., Konov, V.I.**, *Interacția radiației laser cu metalele*, Editura Academiei R.S.R., București, 1986

- [V1] **Vannes A. B.** *Les lasers de puissance*, Hermès- Paris, France, 1988
- [W1] **Walters, C.T., Barmes, R.H., Beverly, R.E.** *J. Appl. Phys.* 49, 1978
- [W2] **Wooten, F.** *Optical Properties of Solids*, Academic Press, N.Y., 1976
- [Z1] **Zamachtchikov, Y., Breaban, F., Vantomme, P., Deffontaine, A.** *Laser Cutting*, Laser in Engineering, Old City Publishing Inc., Vol. 12, 2002, p. 27-34, SUA
- [Z2] **Zel'dovich, Y.B., Raizer, Y.P.** *Physics of shock waves and high temperature hydrodynamic phenomena*. Academic Press, N.Y., 1967
- [***] ******* *La découpe laser*, AIR LIQUIDE, Mundoprint, 2004
- [***] <http://www.flashcutcnc.com>
- [***] <http://www.irepa-laser.com>
- [***] <http://www.homeschooloffish.com>
- [***] <http://www.iiviinfrared.com/tutorials/formulas.html>
- [***] <http://nutek-us.com/wp-hom.html>
- [***] http://en.wikipedia.org/wiki/Taguchi_methods
- [***] <http://www.isixsigma.com/library/content/c020311a.asp>
- [***] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section5/pri56.htm>
- [***] <http://www.mv.com/ipusers/rm/loss.htm>
- [***] http://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI.htm
- [***] http://www.amsup.com/taguchi_methods/index.htm
- [***] <http://www.asq.org/>