

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
Facultatea de Mecanică

ing. IOANA VOICULESCU

**CONTRIBUȚII PRIVIND
OPTIMIZAREA TEHNOLOGIEI DE
PRELUCRARE CU FASCICUL LASER
A MONOCRISTALELOR
DIN SAFIRE ȘI RUBINE SINTETICE**

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

613.443
366 B

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
prof.dr.ing. VASILE POPOVICI

TIMIȘOARA
1997

CUPRINS

1.	Introducere	1
2.	Proprietăți generale ale rubinelor și safirelor sintetice	2
3.	Stadiul actual privind utilizarea monocristalelor din safire și rubine sintetice în diferite domenii tehnice	10
3.1	Utilizarea safirelor și rubinelor în mecanica fină.....	10
3.2	Forme constructive ale lagărelor din safir și rubin sintetic.....	10
3.2.1	Lagăre străpunse din safir sau rubin sintetic.....	11
3.2.2	Lagăre pentru vârfuri din safire sau rubine sintetice.....	16
3.2.3	Lagăre sferice din safire și rubine sintetice.....	24
4.	Metode de creștere a monocristalelor de rubin și safir.....	25
4.1	Materia primă.....	25
4.2	Tehnica de tragere Verneuil.....	26
5.	Tehnologia de prelucrare a lagărelor din safire și rubine artificiale.....	31
5.1	Tehnologia de prelucrare a lagărelor plane din safire și rubine sintetice.....	31
5.2	Prelucrarea cavităților lagărelor din safir sau rubin.....	44
5.2.1	Prelucrarea cavităților sferice.....	44
5.2.2	Prelucrarea cavităților conice	45
5.2.3	Prelucrarea cavităților străpunse.....	48
6.	Modelarea teoretică a procesului de găurire cu laser pentru un impuls.....	54
7.	Analiza statistica a parametrilor fasciculului laser cu scopul de a optimiza prelucrarea microalezajelor în lagăre plane de safire și rubine.....	64
8.	Studiul defectelor structurii cristaline din lagărele de safir sau rubin străpunse cu laser.....	93
9.	Studiul calității suprafețelor lagărelor din safire și rubine artificiale.....	98
10.	Concluzii generale și contribuții originale	106
	BIBLIOGRAFIE.....	109

I. Introducere

În ultimele decenii, odata cu dezvoltarea mijloacelor de prelucrare a cristalelor foarte dure, în industrie se folosește frecvent o gama variata de cristale artificiale precum: agatul, siliciul, germaniul, diamantul, safirul și rubinul. Pe măsura ce omenirea și-a dat seama de posibilitatea unor aplicații industriale cu însușiri potențiale deosebite în accelerarea progresului tehnic și economic, s-a manifestat un interes sporit pentru obținerea acestor cristale pe cale sintetică.

Din categoria pietrelor prețioase fac parte și cristalele din grupa corindonului.

Prin corindon se înțelege monocristalul de alumina, Al_2O_3 , ce cristalizează în sistem hexagonal [83].

Rubinul și safirul fac parte din grupa corindonului.

Datorita proprietăților lor remarcabile monocristalele de safir și rubin sunt frecvent utilizate în industrie în următoarele domenii: mecanică fină, optică, chimie, electronică, industrie textilă și domeniul temperaturilor înalte.

În domeniul mecanicii fine, safirul și rubinul artificial se utilizează la fabricarea de lagare.

Ținând cont de dificultățile tehnologice care stau la baza creșterii monocristalelor din safire și rubine sintetice și a prelucrării lagărelor din aceste monocristale, este necesară optimizarea tuturor fazelor tehnologice începând de la materia primă utilizată și pâna la obținerea produsului finit.

Din multitudinea fazelor tehnologice din care este constituit procesul tehnologic de prelucrare a lagărelor din rubin și safir sintetic, s-a analizat optimizarea prelucrării cu fascicol laser a alezajelor în lagărele plane din safir sau rubin.

S-a abordat acest aspect, pentru că laserul este utilizat cu mare succes la prelucrarea materialelor ceramice și a pietrelor prețioase artificiale.

Se impune corelarea caracteristicilor energetice și temporale ale radiației laser cu proprietățile optice, termice și mecanice ale safirului și rubinului sintetic. [21], [74], [85]

În comparație cu prelucrarea prin eroziune abrazivă ultrasonică, care de asemenea se utilizează la prelucrarea materialelor ceramice și a pietrelor prețioase sintetice, laserul are avantajul că este mai economic. Prelucrarea cu ultrasunete a unui alezaj într-un lagăr de safir sau rubin sintetic durează 30 de secunde și este de aproximativ 3 ori mai scumpă de cât prelucrarea cu fascicol laser [53].

Pentru a se optimiza prelucrarea cu fascicol laser a microalezajelor în lagărele plane de safire și rubine artificiale, s-au studiat proprietățile rubinelor și safirelor sintetice, formele constructive ale lagărelor din safir și rubin sintetic, metode de creștere a monocristalelor din safir și rubin (în special metoda Verneuil) și tehnologia de prelucrare a lagărelor din safire și rubine artificiale.

Pentru a se analiza parametrii fascicolului laser în scopul de a se optimiza prelucrarea cu fascicol laser s-a executat un experiment utilizând 840 lagare de alunecare plane, pentru mecanică fină. Experimentul a fost realizat la I.A.E.M. Timișoara și are ca punct de plecare o idee mai veche a prof.dr.ing. A. Nichici și a prof.dr.ing. V. Popovici.

S-a studiat instalația laser utilizată la I.A.E.M. Timișoara și s-a studiat procesul de găurire cu laser.

În scopul de a se optimiza prelucrarea microalezajelor cu fascicol laser, datele experimentului inițial au fost utilizate pentru aplicarea metodei bilanțului aleator și au fost adecvate aplicării experimentului factorial de tipul 2^4 .

Ca metodă de optimizare s-a folosit metoda gradientului sau metoda deplasării după direcția de pantă maximă.

S-au analizat defectele structurii cristaline din lagărele de safir sau rubin străpunse cu laser și calitatea suprafețelor lagărelor din safire și rubine artificiale.

În finalul lucrării sunt expuse concluziile generale și contribuțiile personale.

Teza de doctorat este dezvoltată în zece capitole și cuprinde 143 pagini, 128 figuri, 28 tabele, 40 microfotografii, 108 referințe bibliografice și a fost elaborată sub conducerea prof.dr.ing. V. Popovici.

Doresc să aduc cele mai calde mulțumiri domnului profesor dr.ing. Vasile Popovici, conducătorul științific, pentru acceptarea mea la pregătirea tezei de doctorat, încurajarea și îndrumarea cercetărilor în domeniul tezei.

Mulțumesc de asemenea domnului prof.dr.ing. Alexandru Nichici ale cărui sfaturi deosebit de utile, au contribuit la conturarea și elaborarea lucrării. Un sprijin prețios l-am obținut și de la ș.l.ing. Eugen Cicală, care m-a ajutat cu generozitate, prin discuții directe și material bibliografic, să finalizez această cercetare.

O contribuție substanțială la formarea mea în domeniul științei ingineresti a avut-o prof.dr.ing. N.Gheorghiu. Găsesc aici prilejul de a-i mulțumi.

În formarea mea ca specialist în domeniul construcției de aparate de mecanică fină, cu care teza mea de doctorat are elemente comune, l-am avut ca model pe prof.dr.ing. Dan Perju. Mă aflu în situația în care cuvintele nu pot exprima nici pe departe profunzimea sentimentelor de respect și recunoștință.

Mulțumesc dl. conf.dr.ing. Mihai Ghiță, care în calitate de director al I.A.E.M. Timișoara mi-a permis să efectuez minuțioase cercetări experimentale pe instalația laser, utilizând aproape o mie de lagare și mi-a înlesnit colaborarea cu dl. tehnician Horvath Vichente, om de o excepțională profesionalitate și generozitate.

Aduc mulțumirile mele domnului prof.dr.ing. Giulio Morteani, de la Universitatea Tehnică din München, care mi-a facilitat studiul în biblioteca acestei celebre universități și mi-a oferit cu generozitate accesul la microscopul electronic.

În egală măsură mulțumirile sunt și pentru părinții mei, precum și pentru câțiva prieteni dragi (prof.dr.ing. D. Ceaușescu și Ali), care m-au încurajat și ambiționat să finalizez această teză de doctorat.

2. Proprietățile generale ale rubinelor și safirelor sintetice.

Corindonul sintetic are o serie de proprietăți chimice și fizice excepționale care îl diferențiază de celelalte materiale. [106]

Corindonul este extrem de dur. El are duritatea 9 pe scara Mohs. După cum se vede din diagrama din figura 2.1, duritatea lui este întrecută doar de diamant, care are duritatea 10 pe aceeași scară.

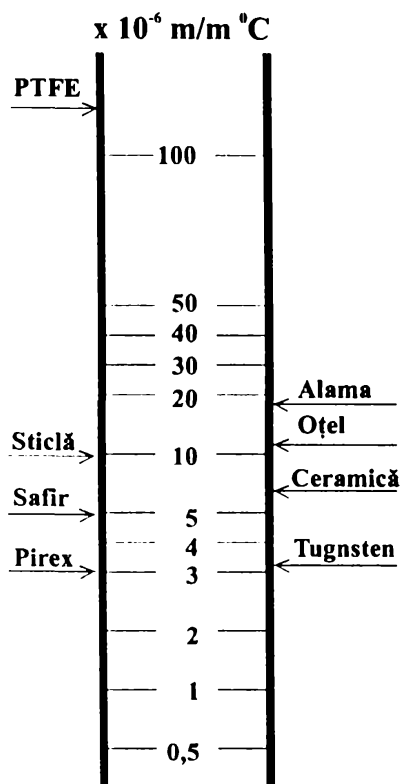


Fig. 2.2

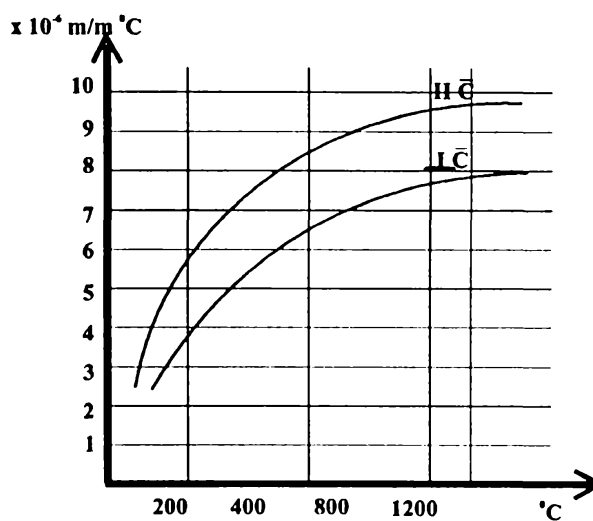


Fig. 2.3

Safirul și rubinul sunt bune conducătoare de căldură. În diagrama din fig. 2.4 este redată conductivitatea termică a safirului și rubinului în comparație cu alte materiale.

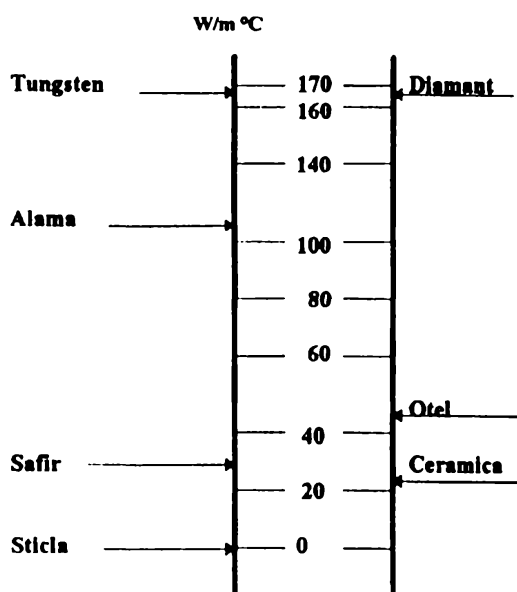


Fig. 2.4

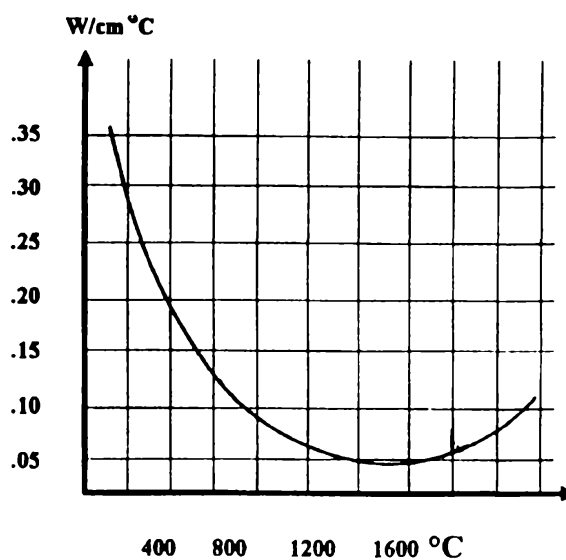


Fig. 2.5

În figura 2.5 se observă cum scade conductivitatea termică a safirului și rubinului în funcție de temperatură în domeniul temperaturilor înalte.

În figura 2.6 este redată variația conductivității termice în funcție de temperatură la safir în comparație cu alte materiale în domeniul temperaturilor joase.

Corindonul este un bun izolator, el având constanta dielectrică mare (7.5 până la 10), aspect pus în evidență în fig. 2.7 prin compararea constantei dielectrice a safirului cu constantele corespunzătoare altor materiale.

Din fig. 2.8 se observă că safirul și rubinul au pierderi dielectrice foarte reduse la temperatura camerei. Dacă temperatura crește, cresc puternic și pierderile dielectrice figura 2.9. Pierderile dielectrice, $\text{tg}\delta$ sunt diferite dacă câmpul electric este paralel cu axa optica $E \parallel \bar{c}$, sau este perpendicular pe aceasta $E \perp \bar{c}$.

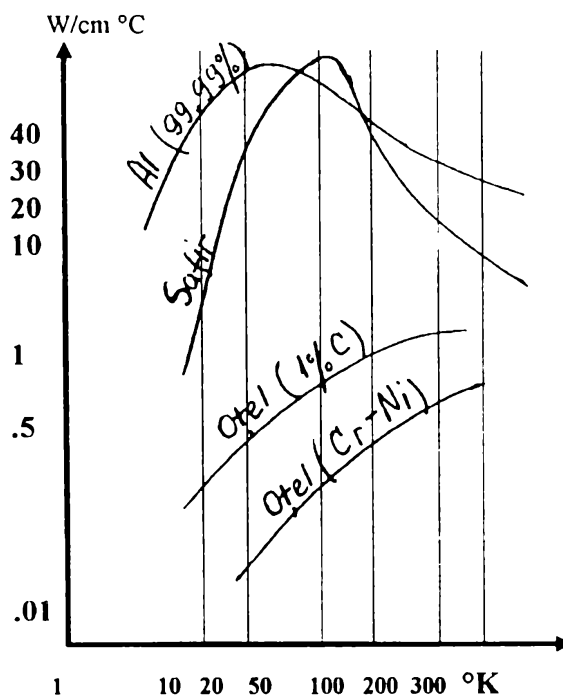


Fig. 2.6

Permitivitatea dielectrică ϵ , este constantă la temperatura camerei, $25 \text{ } ^\circ C$, figura 2.10.

Pierderile dielectrice variaza foarte puțin în funcție de frecvență, figura 2.11.

Constanta dielectrică ϵ crește foarte puternic în funcție de variațiile temperaturii figura 2.12.

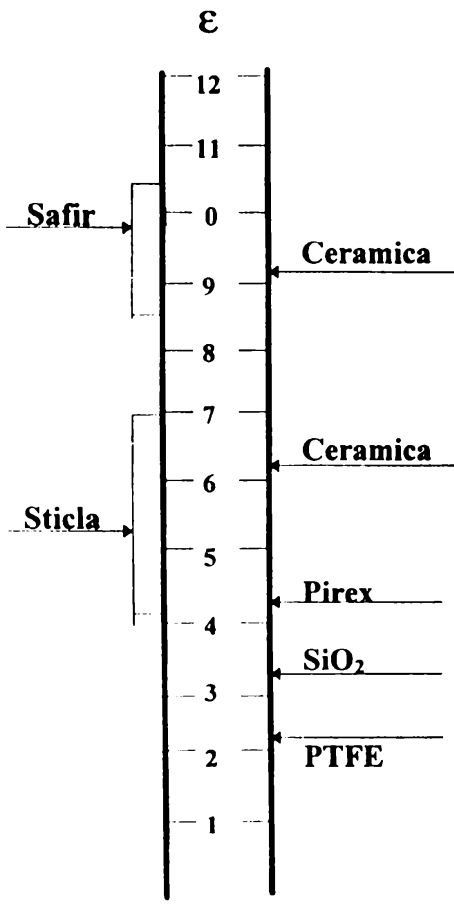


Fig. 2.7

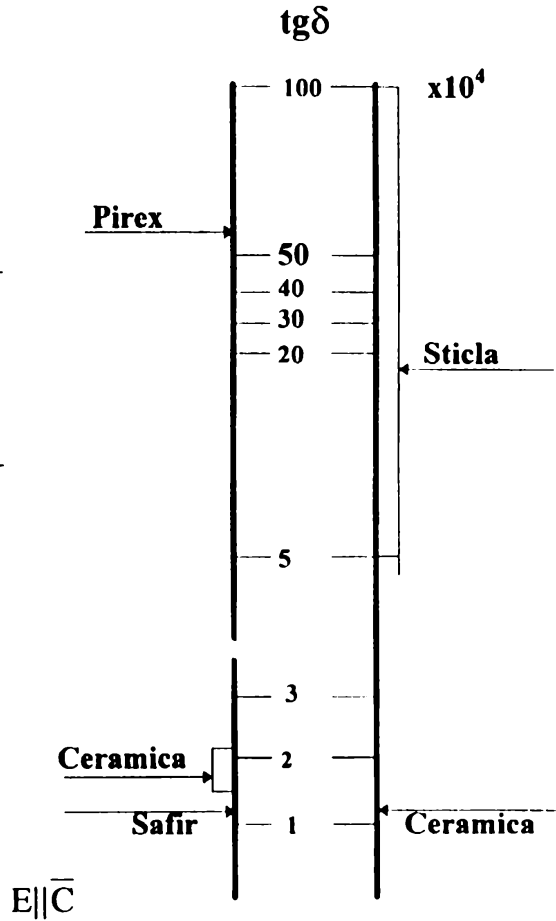


Fig. 2.8

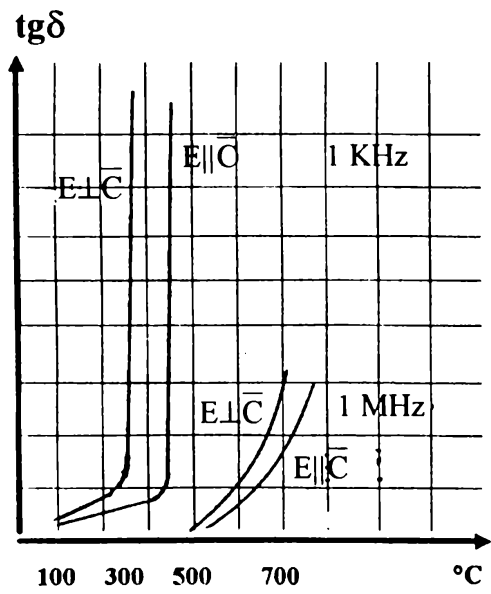


Fig. 2.9

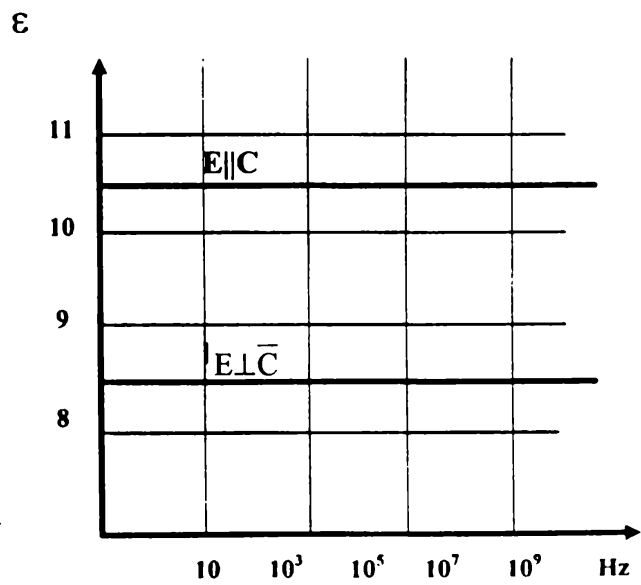


Fig. 2.10

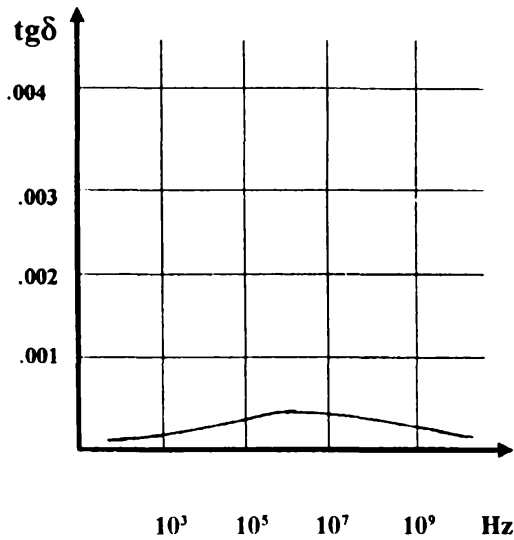


Fig. 2.11

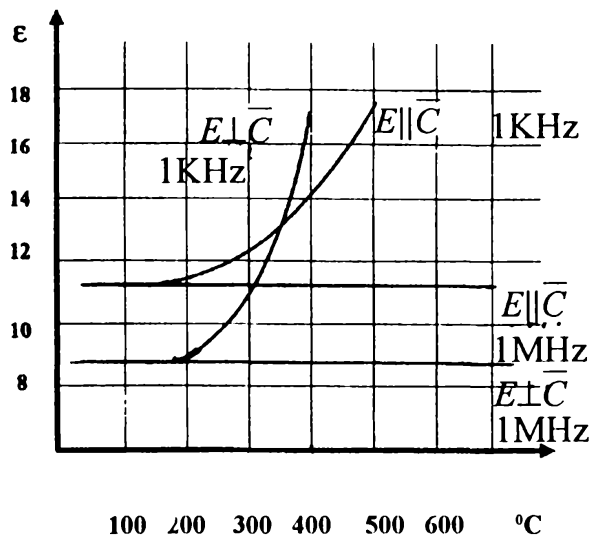


Fig. 2.12

Corindonul are proprietăți optice deosebite. Datorită anizotropiei corindonul este birefringent.

Indicele de refracție n corespunzător planelor paralele cu axa optică \bar{c} este de 1,769, iar pentru planele perpendiculare cu axa optică \bar{c} este de 1,76. În diagrama din figura 2.13 este pus în evidență indicele de refracție n al safirului în comparație cu indicii de refracție ai altor materiale transparente.

Variația indicelui de refracție în funcție de lungimea de undă este redată în figura 2.14 iar dispersia indicelui de refracție al safirului în funcție de lungimea de undă este redată în figura 2.15.

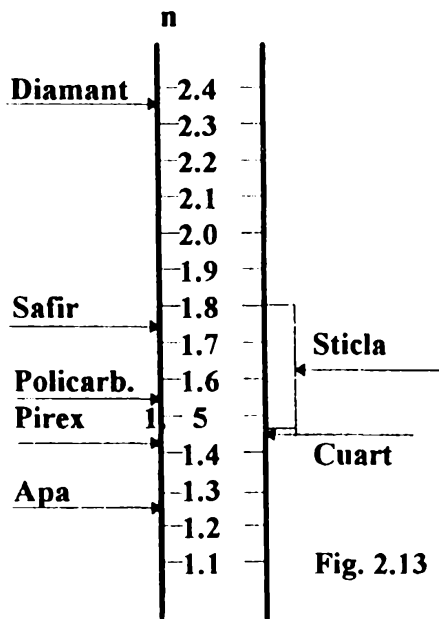


Fig. 2.13

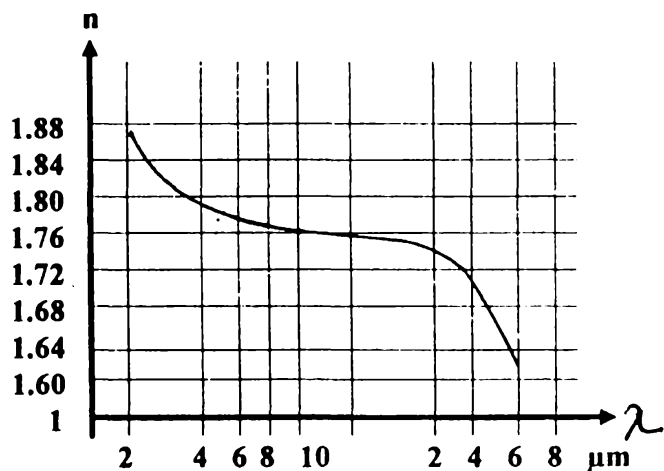


Fig. 2.14

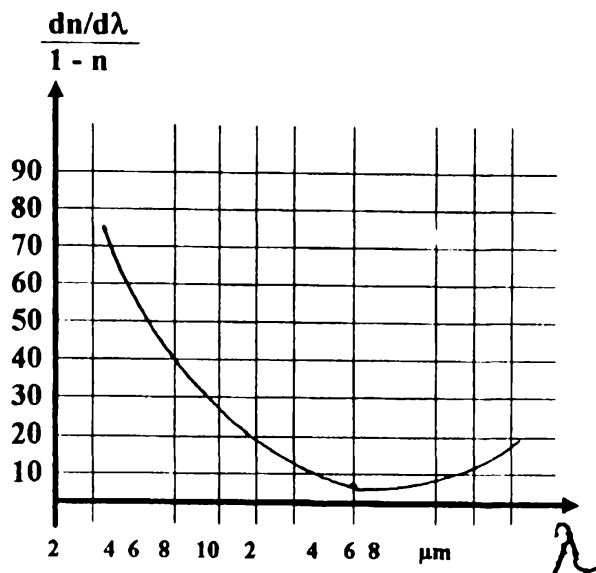


Fig. 2.15

Safirul și rubinul pe lângă proprietăți optice, electrice și termice excepționale au și proprietăți mecanice deosebite.

Astfel modulul de elasticitate al safirului și rubinului este de 35×10^2 până la 39×10^2 MPa. Rezistența la compresiune este de 21 MPa, iar rezistența la tracțiune 1,9 MPa. Studiind diagrama din figura 2.16 se observă că safirul are modulul de elasticitate ridicat în comparație cu alte materiale, deci rezistența safirului la compresiune și tracțiune este foarte bună.

Diagrama din figura 2.17 reflectă faptul că rezistența la compresiune a safirului este mai mare decât rezistența la tracțiune. Rezistența la compresiune în funcție de temperatură este redată în figura 2.17. Rezistența la tracțiune în funcție de temperatură este pusă în evidență în figura 2.18.

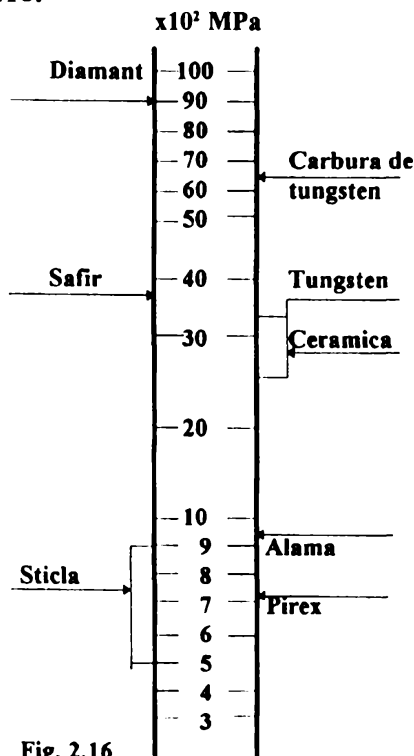
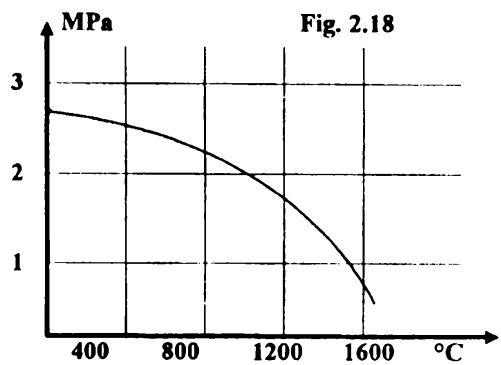
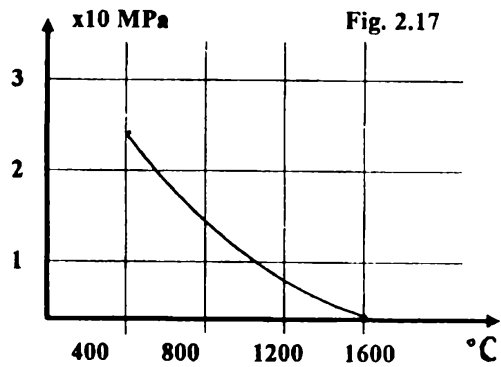


Fig. 2.16



Corindronul are o formulă chimică simplă: Al_2O_3 . Ordonarea atomilor de aluminiu și a atomilor de oxigen în structura cristalină a corindonului este reprezentată în figura 2.19. Atomii relativi mari de oxigen construiesc o dublă piramidă octaedrică în jurul atomului de dimensiuni mici de aluminiu.

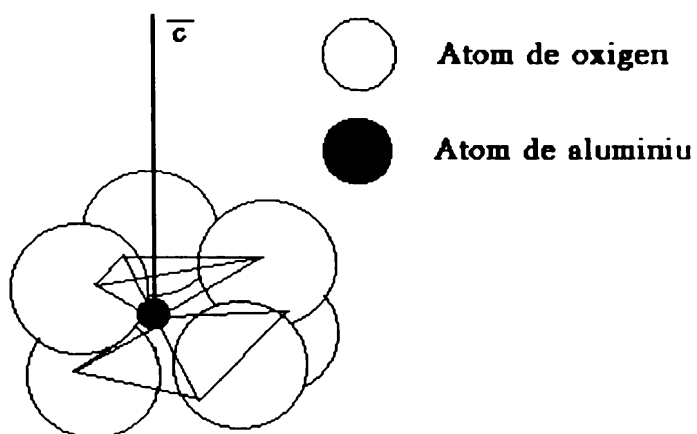
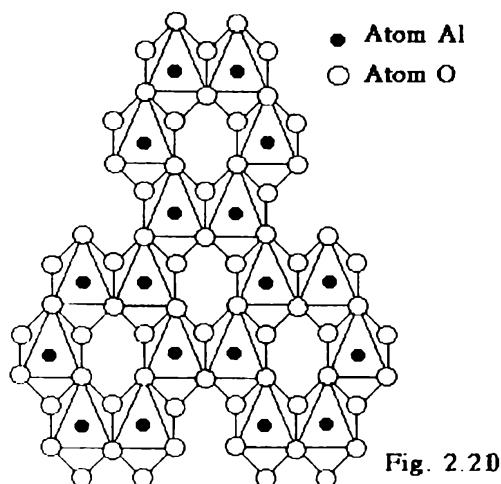


Fig. 2.19

Rețeaua cristalină a corindonului este reprezentată în figura 2.20.



O altă calitate specială a rubinului și safirului este că au punctul de topire foarte ridicat 2030 °C.

Datorită acestui avantaj, rubinele și safirele pot fi folosite în construcția aparatelor care funcționează în medii cu temperaturi înalte.

3. Stadiul actual privind utilizarea monocristalelor din safire, și rubine sintetice în diferite domenii tehnice

Datorită proprietăților lor remarcabile monocristalele de safir și rubin exercită un interes deosebit fiind larg utilizate în următoarele domenii: industria bijuteriilor, mecanică fină, optică, chimie, electronică, industria textilă și domeniul temperaturilor înalte.

3.1 Utilizarea safirelor și rubinelor în mecanică fină

În domeniul mecanicii fine, monocristalele de safire și rubine se utilizează frecvent datorită durtății lor mari și a totalei lipse de porozități.

De asemenea, ele au și o mare rezistență la compresiune, iar uzura mecanică care apare în timpul funcționării este nesemnificativă.

Aceste calități deosebite ale monocristalelor de safir și rubin permit prelucrarea lor la dimensiuni mici, iar suprafețele care se obțin sunt excepțional de fine. Astfel, în mecanică fină, monocristalele de safir și rubin reprezintă materia primă pentru lagăre, duze calibrate, cuțite pentru balanțe, bile pentru rulmenți, ghidaje pentru fire în industria textilă. Lagărele din safire și rubine se folosesc la aparate de măsură și control cum sunt: ceasuri comparatoare, microcomparatoare, pasametre, minimetre, tahometre, galvanometre, dinamometre, viscozimetre, aparate de bord în aviație, marină și vehicule terestre [107].

3.2 Forme constructive ale lagărelor de safir sau rubin sintetic.

Din nenumăratele posibilități de utilizare ale safirelor și rubinelor se analizează detaliat doar lagărele din safire și rubine pentru că acestea reprezintă punctul central de interes al acestei lucrări.

Datorită diversității mari de aparate care folosesc lagăre din safire și rubine, forma lagărelor este foarte variată. Există lagăre străpunse, lagăre pentru vârfuri, lagăre sferice și lagăre pentru cuțite. [261, [27], [28], [41], [49]

3.2.1 Lagăre străpunse din safir sau rubin sintetic.

Lagărele străpunse sau cilindrice au forma din figura 3.1 sau 3.2. Acest tip de lagăr suportă atât încărcări radiale cât și încărcări axiale și este dimensionat pentru momente de frecare mici. [39], [50], [54], [57]

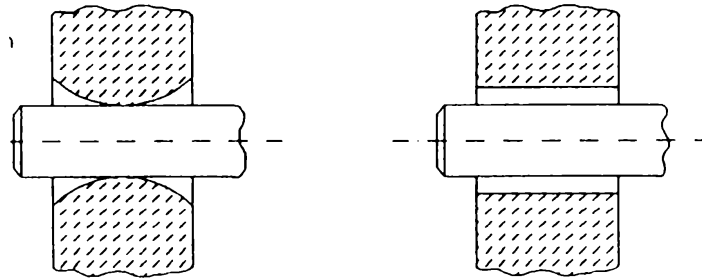


Fig. 3.1

Fig. 3.2

Experimental s-a stabilit următoarea formulă pentru momentul de frecare (1) în cazul lagărelor strapunse, care au generatoarea alezajului rotunjită hiperboloidală figura 3.1 unde F este reacțiunea radială din lagăr, μ este coeficientul de frecare uscată oțel pe safir, iar d este diametrul axului.

În cazul unui alezaj circular, momentul de frecare (2) este mai mare pentru că suprafața de contact dintre fus și lagăr este mai mare figura 3.2.

$$M_f = 1/6 \mu F d \quad (1)$$

$$M_f = 1/3 \mu F d \quad (2)$$

Fusurile se prelucrează din oțeluri foarte dure, se construiesc perfect cilindrice cu diametrele cuprinse între 0,07 și 5 mm și au posibilitatea de ungere cu unsoare consistentă sau cu uleiuri.

Cuzineții din rubine și safire corespunzători lagărelor cilindrice sunt străpunși pe toată lungimea lor, iar în secțiune transversală au formă cilindrică.

În cazul încărcărilor radiale se folosesc cuzineți străpunși de o gaură cilindrică ca în figura 3.3., acest tip de cuzinet preia însă și șaare încărcări axiale.

Pentru a micșora frecarea la minim se utilizează cuzineți cu alezajul interior hiperboloidal, figura 3.4.

Acest tip de lagăr este foarte sensibil la șocuri.

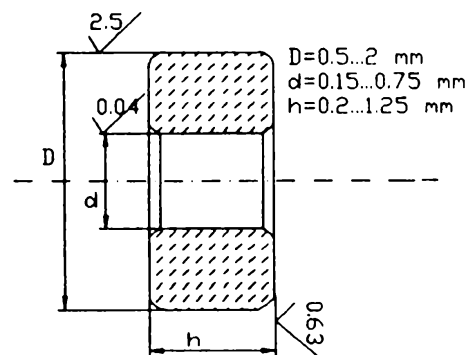
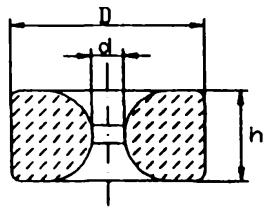


Fig. 3.3

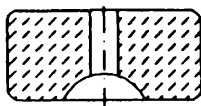


$d=0,3...0,8$ mm
 $D=1,5...2$ mm
 $h=0,4...1$ mm

Fig. 3.4

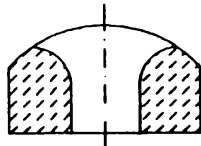
În cazul lagărelor cu frecare mixtă se utilizează cuzineți cu locaș sferic pentru rezervorul de ulei, figura 3.5.

În cazul încărcărilor axiale pentru a reduce cât mai mult coeficientul de frecare se utilizează cuzineți ca în figura 3.6. Acest tip de cuzinet se prelucrează doar din safir artificial.



$D=0,7...5,2$ mm
 $d=0,08...2,2$ mm
 $h=0,16...1,5$ mm

Fig. 3.5

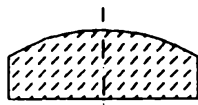


$D=0,7...3,2$ mm
 $d=0,07...0,8$ mm
 $h=0,14...0,8$ mm

Fig. 3.6

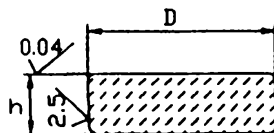
Ca să poată prelua și forțe axiale, lagărele străpuse se folosesc în combinație cu plăci cuzineți. În figura 3.7 este prezentată o placă cuzinet care poate fi prelucrată din safir sau rubin sintetic.

Există și plăci cuzinet plane după cum se vede în figura 3.8.



$D=0,7...3$ mm
 $h=0,16...0,8$ mm

Fig. 3.7



$D=2,5...3$ mm
 $h=0,8...5$ mm

Fig. 3.8

Montarea pietrelor cuzineți se face prin presare figura 3.9 sau prin bordurare figura 3.10.

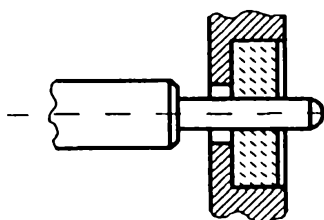
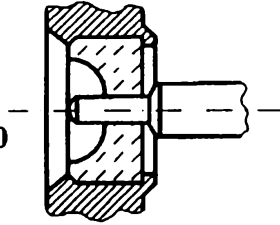


Fig. 3.9

Fig. 3.10



Exemple cu lagăre cilindrice sunt foarte variate. Există posibilitatea ca distanța dintre cuzinetul străpuns și plăcuța cuzinet să fie invariabilă figurile 3.11, 3.12 și 3.13.

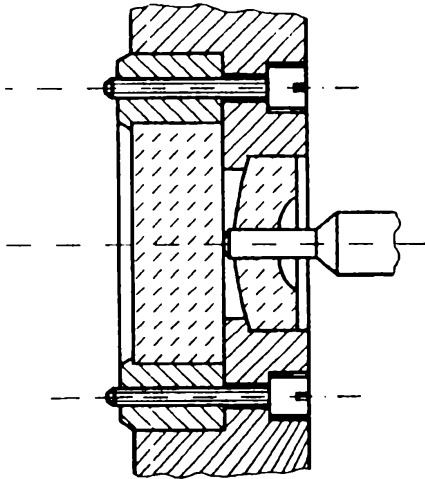
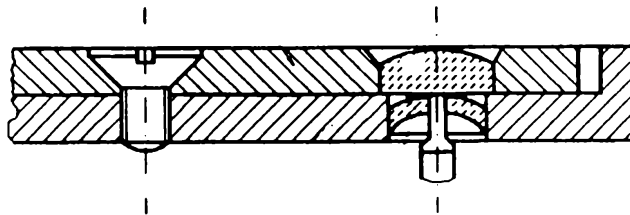


Fig. 3.11

Fig. 3.12



După cum se vede din aceste exemple, plăcuța cuzinet preia forțele axiale, limitând deplasarea axială a fusului. Lagărul străpuns și plăcuța cuzinet sunt montate nereglabil pentru a împiedica uleiul (reprezentat în exemple ca o pată neagră) să curgă.

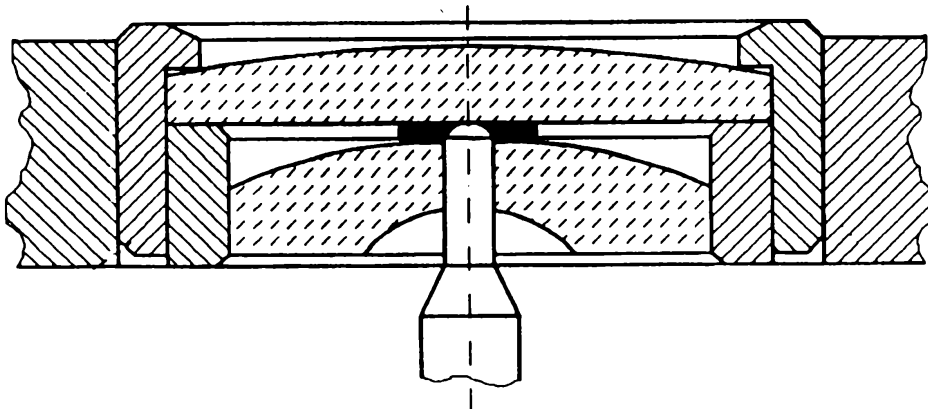


Fig. 3.13

Distanța dintre lagăr și placa cuzinet este de aproximativ 0,05 mm pentru a favoriza formarea unei pelicule de ulei și păstrarea uleiului în acea regiune datorita forțelor de tensiune superficială. Pentru a micșora momentul de frecare, capătul fusului nu este plat, ci este rotunjit, pentru un contact punctiform dintre placa cuzinet și fus.

Uneori este necesară reglarea axială a axului. Acest lucru este posibil printr-o fixare reglabilă a lagărului străpuns și a cuzinetului, amândoi fiind montați nereglabil în interiorul unui șurub figura 3.14.

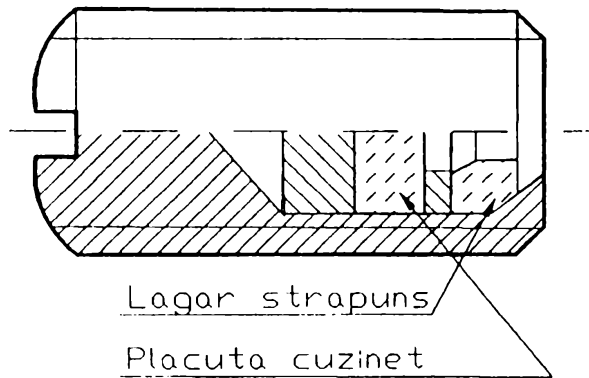


Fig. 3.14

O soluție mai completă este cea din figura 3.15. Lagărul străpuns 2 este montat într-o bucășă filetată 1, atât în interior cât și în exterior; iar în interiorul buceșii filetate se înfiletează un știft filetat 5, în care este montată plăcuța cuzinet 4.

După cum se observă, axul 3 este prevăzut cu un fus în formă de trompetă pentru ca deplasarea lagărului să nu stânjenească funcționarea axului.

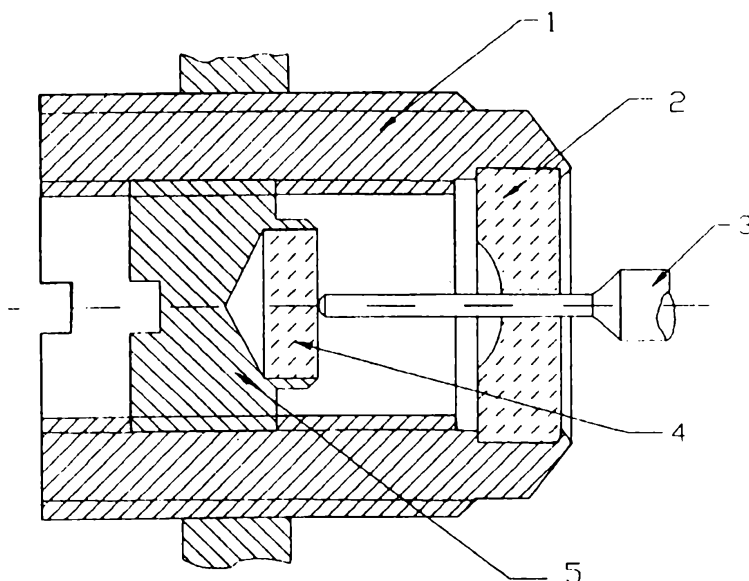


Fig. 3.15

În cazul în care aparatele funcționează în regim de șocuri sau vibrații, lagărele străpunse sunt prevăzute cu amortizoare pentru șocuri, lovituri, sau vibrații.

Aceste lagăre au ca element amortizor pentru șocuri un arc plan. Pentru preluarea șocurilor axiale se folosește montajul din figura 3.16.

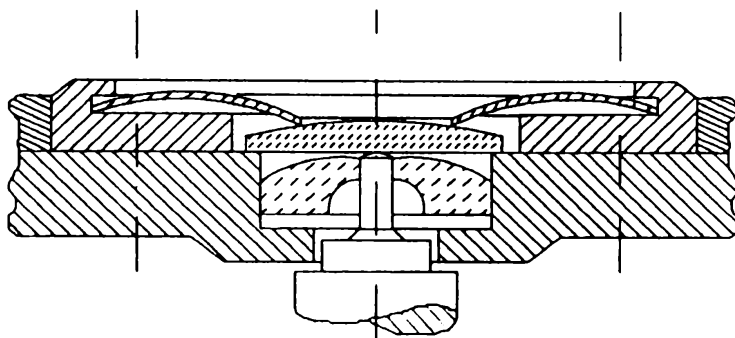


Fig. 3.16a

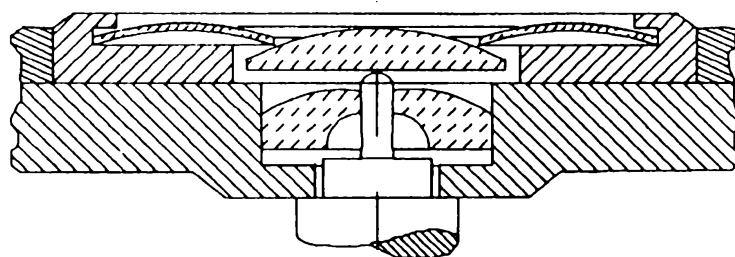
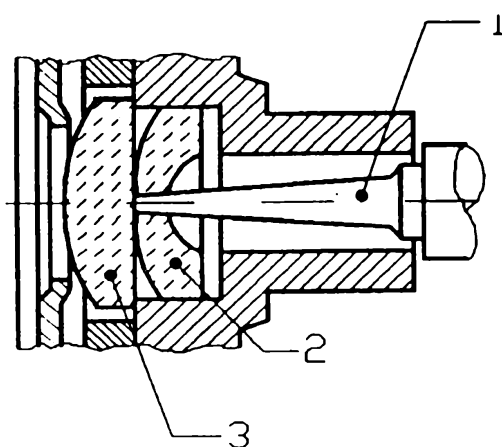


Fig. 3.16b

Lagărul străpuns este montat prin presare, iar plăcuța cuzinet este introdusă în degajarea corespunzătoare ei. În urma unui șoc sau vibrații plăcuța cuzinet se deplasează axial, după cum se vede în figura 3.16b și este readusă de arc plan în poziția inițială. Săgeata arcului trebuie să fie limitată axial. În cazul când este necesar ca pe lângă șocurile axiale să se amortizeze și șocurile radiale se poate folosi montajul din figura 3.17, fusul este sub formă de trompetă, șocurile radiale fiind amortizate datorită elasticității fusului.



- 1 fus
- 2 lagăr străpuns
- 3 plăcuță cuzinet

Fig. 3.17

Alte soluții pentru amortizarea șocurilor și vibrațiilor atât axiale cât și radiale sunt prezentate în figurile 3.18, 3.19 și 3.20.

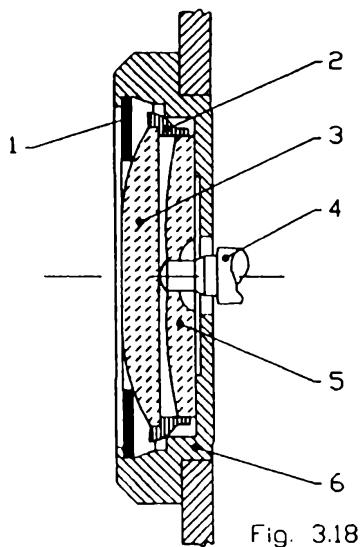


Fig. 3.18

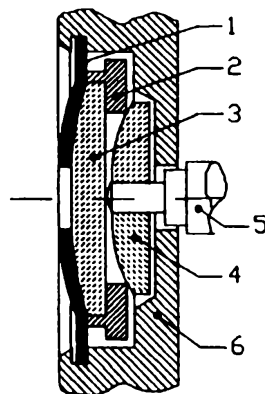


Fig. 3.19

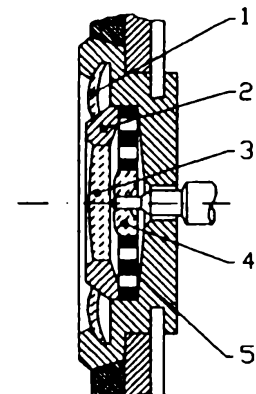


Fig. 3.20

În figura 3.18, arcul plan 1 este elementul amortizor, preluând atât lovituri axiale cât și radiale. Lagărul străpuns 5 precum și placa cuzinet 3 sunt presate în piesa 2, care în exterior are formă conică. Datorită șocurilor radiale sau axiale piesa conică 2 își schimbă poziția și este adusă în poziția inițială de arcul plan 1. Când piesa 2 ocupă poziția inițială, axul 4 este în poziția de funcționare corectă.

În figura 3.19 lagărul străpuns este liber, iar plăcuța cuzinet este presată în piesa 2, care deasemenea ocupă o poziție liberă în interiorul piesei 6. Arcul 1 nu permite plăcuței cuzinet și lagărului să cadă în exterior.

În figura 3.20 șocurile radiale sunt amortizate de arcul spiral plan 5. Lagărul străpuns 4 este montat la capătul liber interior al arcului plan. Șocurile axiale sunt preluate de arcul 1, prin intermediul piesei 2, care culisează axial, în lăcașul destinat ei prelucrat în piesa suport.

3.2.2 Lagăre pentru vârfuri din safire sau rubine sintetice

La lagărele pentru vârfuri, fusul are o formă conică cu terminație sferică, iar suprafața cuzinetului este sferică vezi figura 3.21, sau conică cu adâncitura sferică vezi figura 3.22. [58], [78]

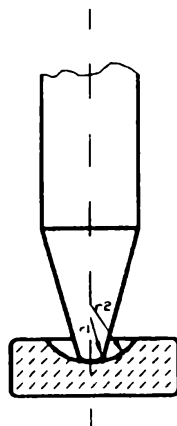


Fig. 3.21

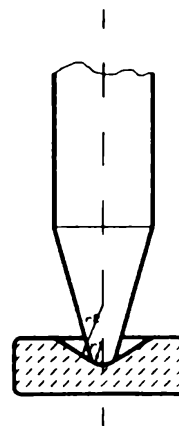


Fig. 3.22

Raza vârfului r_1 are valori foarte mici, mai mici decât raza cuzinetului r_2 , iar contactul dintre cele două elemente este teoretic punctiform.

Se utilizează la sprijinirea părții mobile a aparatelor de precizie unde se cer momente de frecare foarte mici.

Ca poziție pot funcționa vertical sau orizontal. Forme constructive de cuzineți sunt reprezentate în figura 3.23, cuzinet cu adâncitura conică, figura 3.24, cuzinet cu adâncitura sferică - simplă și figura 3.25, cuzinet cu adâncitura sferică dublă.

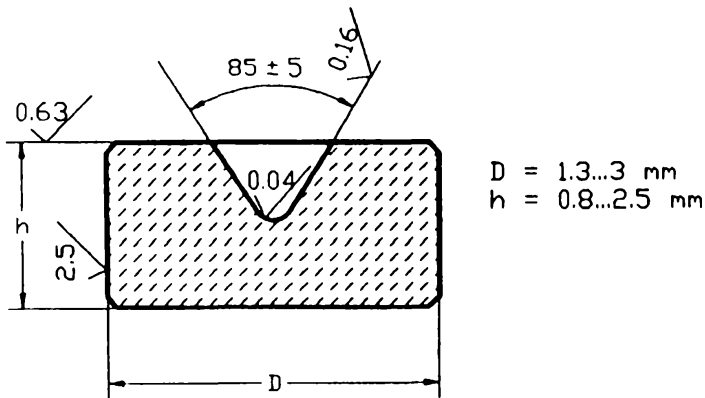


Fig. 3.23

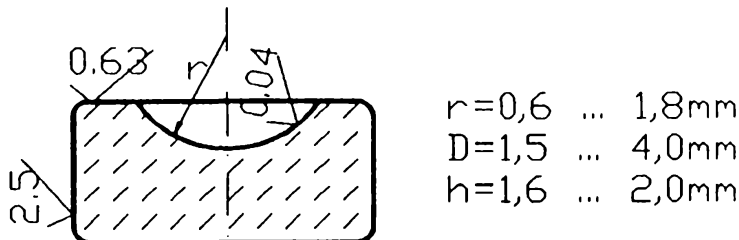


Fig. 3.24

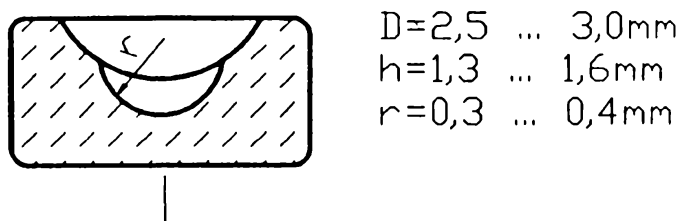


Fig. 3.25

Montajul cuzinetului se face de regulă într-un suport filetat pentru reglajul jocurilor axiale prin încliere, figura 3.26a sau prin răsfrângere figura 3.26b sau cu o rondea și rezemare elastică figura 3.26c.

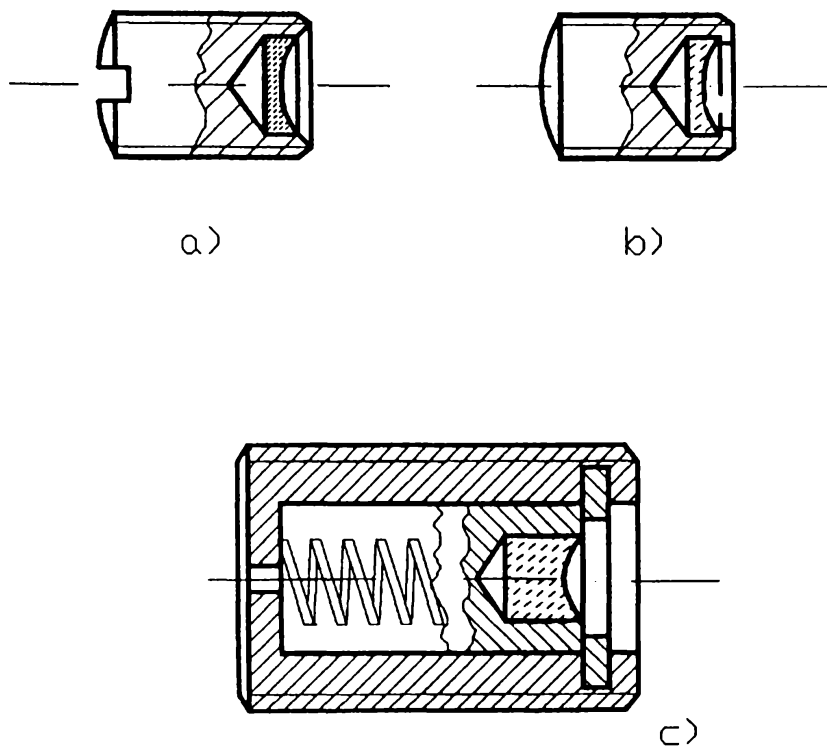


Fig. 3.26

În figura 3.27 este prezentat un exemplu de montaj al unui lagăr pentru vârfuri, la care cuzinetul este montat prin răsfrângere în interiorul unui suport filetat.

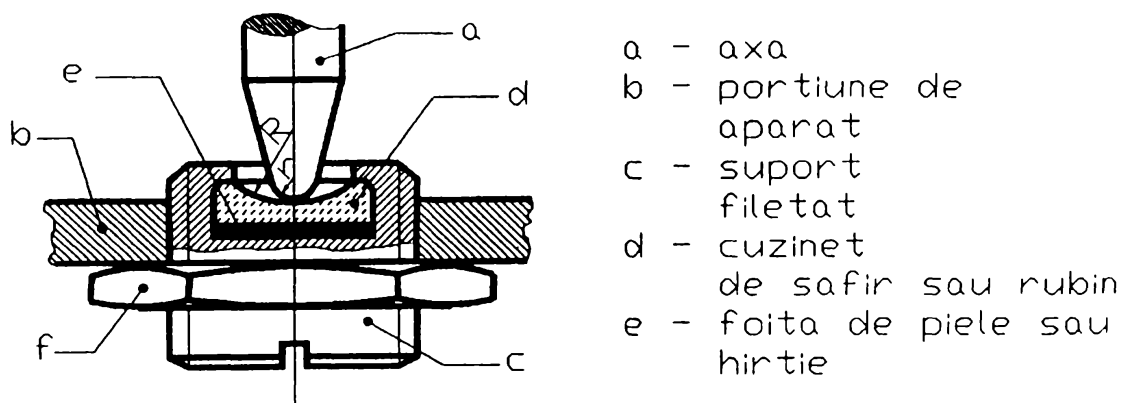


Fig. 3.27

Un exemplu de montaj al unui cuzinet cu rezemare elastică este redat în figura 3.28 și 3.29.

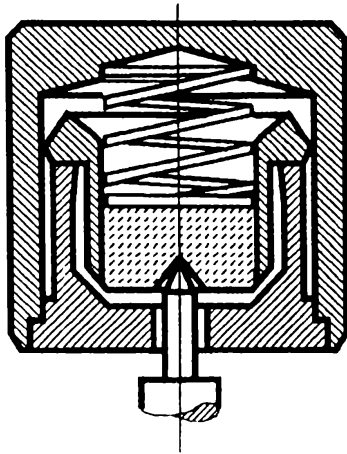


Fig. 3.28

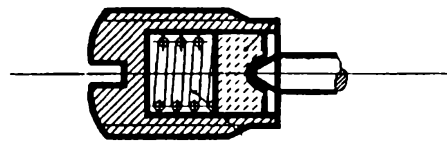


Fig. 3.29

Această soluție de montare a cuzinetului are scopul de a amortiza șocurile. Arcul cilindric elicoidal este un bun amortizor de șocuri.

Lagărul este sprijinit pe arc și este introdus prin ajustaj alunecător în alezajul corespunzător lui.

Foarte bun amortizor de șocuri este arcul elicoidal conic figura 3.30. Inelul 2 este introdus prin presare în bușa 1, iar lagărul pentru vârfuri este introdus prin presare în piesa circulară 5, care are rolul să asigure o mai bună centrare a lagărului 3.

Lagărele pentru vârfuri lucrează neunse, pentru ca funcționarea lor este mult îngreunată de diferite impurități care ar putea să adere în zona unsă.

În figurile 3.31, 3.32 și 3.33 sunt exemple de lagăre pentru vârfuri care funcționează în poziția verticală și fac parte din mecanismul aparatelor de măsură electrică. Astfel, în figura 3.31 lagărele pentru vârfuri sunt în exteriorul bobinei electrice 4, iar în figura 3.32 lagărele sunt în interiorul bobinei electrice. Lagărele pentru vârfuri sunt sensibile la variațiile de temperatură, în cazul dilatării axului există pericolul înțepenirii; de aceea, între fus și cuzinet se lasă un ușor joc 'a' la montaj, figura 3.31. Jocul 'a' are valori cuprinse între 25 - 35 μm . Datorită acestui joc axa de simetrie a bobinei 4, nu se suprapune peste axa de simetrie a aparatului și apare o eroare de indicație la acul indicator care este solidar cu bobina.

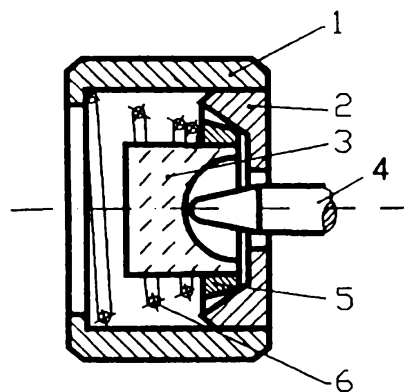


Fig. 3.30

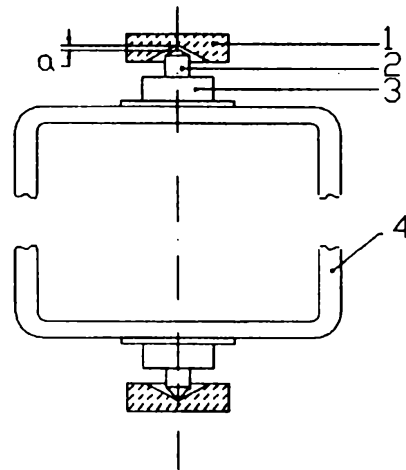


Fig. 3.31

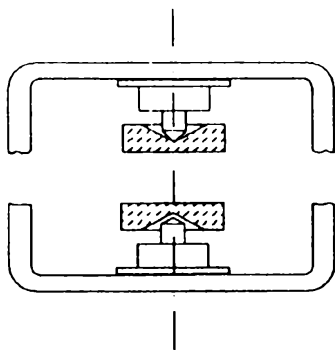


Fig. 3.32

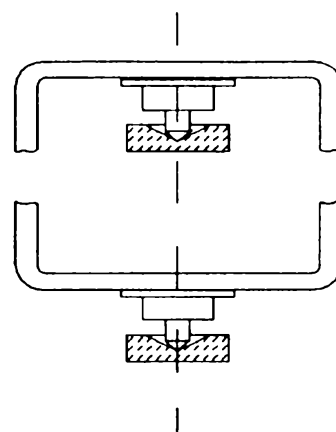


Fig. 3.33

Pentru a mări precizia de măsurare se folosește montajul din figura 3.32, unde bobina care este agățată în lagărul superior are o poziție foarte stabilă, iar axa de simetrie a bobinei corespunde cu axa geometrică a montajului. Dezavantajul acestei soluții constă în faptul că distanța dintre vârfuri este mult mai mică în comparație cu figura 3.31, iar lagărele trebuie executate și reglate foarte precis.

Pentru a mări distanța dintre vârfuri se poate folosi soluția din figura 3.33, unde se păstrează sprijinirea bobinei în lagărul superior iar celalalt lagăr este în exteriorul bobinei. Acest tip de montaj nu este influențat de variațiile de temperatură.

Montajele din figurile 3.31,3.32,3.33 sunt foarte sensibile la șocuri, vibrații, lovituri; de aceea trebuie conceput un sistem de asigurare împotriva șocurilor și loviturilor figura 3.34.

Ca element amortizor pentru șocuri se folosește un arc lamelar 5 figura 3.34a. Lagărul pentru vârfuri este montat în piesa conică 4 care se poate mișca liber în bușca 2. Arcul lamelar 5 menține lagărul 3 pe aceeași axa cu fusul. În cazul șocurilor axiale figura 3.34b, sau radiale, figura 3.34c, piesa 4 își modifică poziția și este adusă în poziția inițială de către arcul lamelar 5.

Un exemplu clasic pentru lagăre pentru vârfuri verticale este busola, figura 3.35.

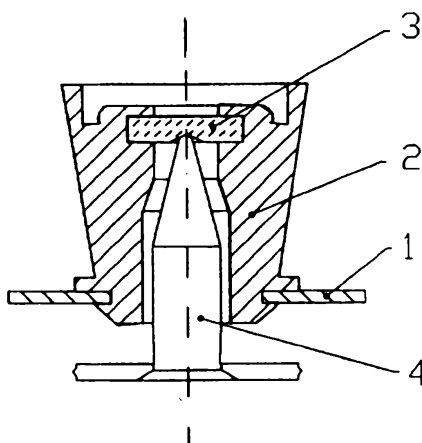
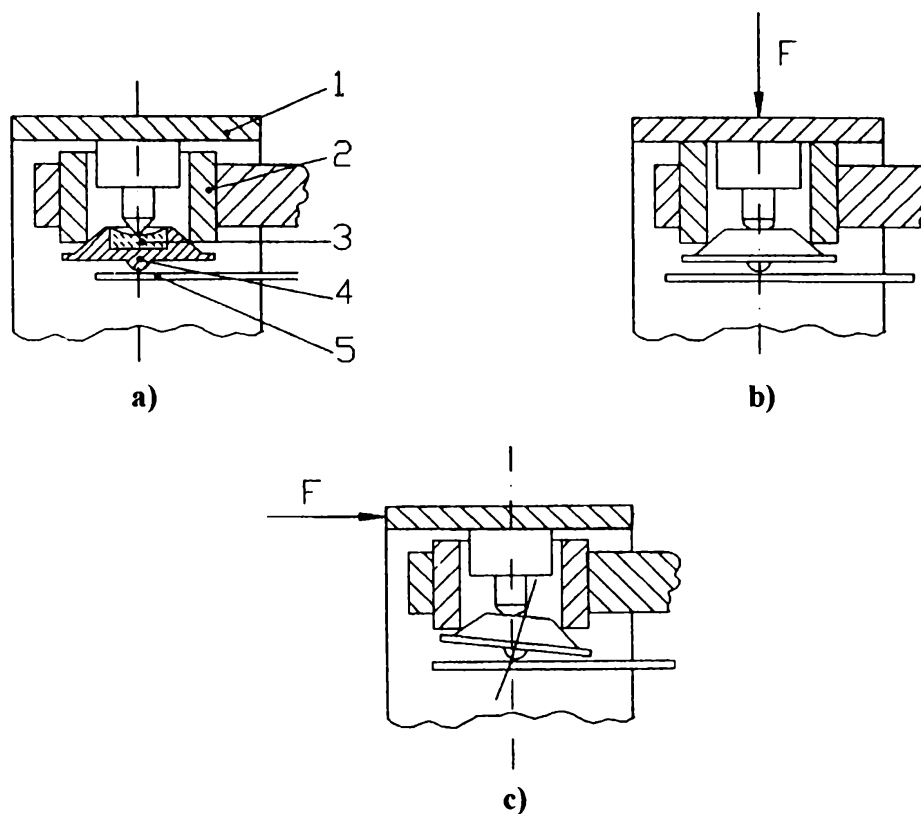


Fig. 3.35

Acul magnetic este fixat de bucașa 2 în care se găsește cuzinetul 3; întregul sistem mobil se află în echilibru pe vârful fusului 4.

Lagărele pentru vârfuri care funcționează în poziție verticală se utilizează la construcția contoarelor electrice, pentru sprijinirea discului circular. Pentru a reduce momentul de frecare la minim se utilizează lagăre din safire sau rubine sintetice.

În partea inferioară axul discului este montat ca în figura 3.36 sau 3.37.

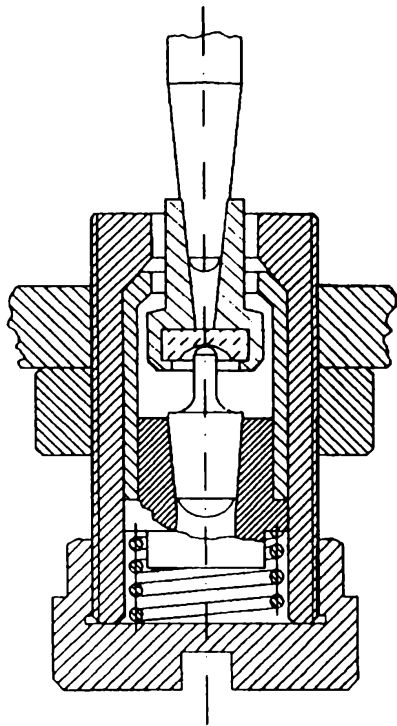


Fig. 3.36

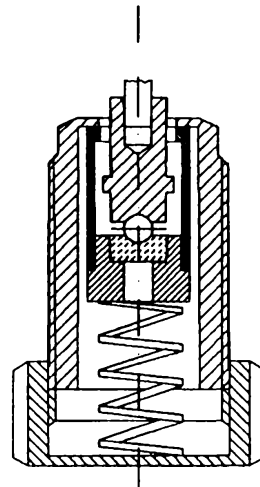


Fig. 3.37

În figura 3.36 vârful fusului este sferic și este fix, iar cuzinetul este mobil. În figura 3.37 fusul axului este sferic având o bilă încastrată în vârf. Fusul se rotește, iar în această soluție de montaj cuzinetul este fix. În ambele situații șocurile axiale sunt preluate de arcul cilindric elicoidal. Pentru partea superioară, există soluții de montaj total diferite cu cele folosite pentru sprijinirea axului în partea inferioară.

Soluțiile de lagăr pentru partea superioară a axului discului de la contoare electrice sunt prezentate în figura 3.38a, și 3.38b.

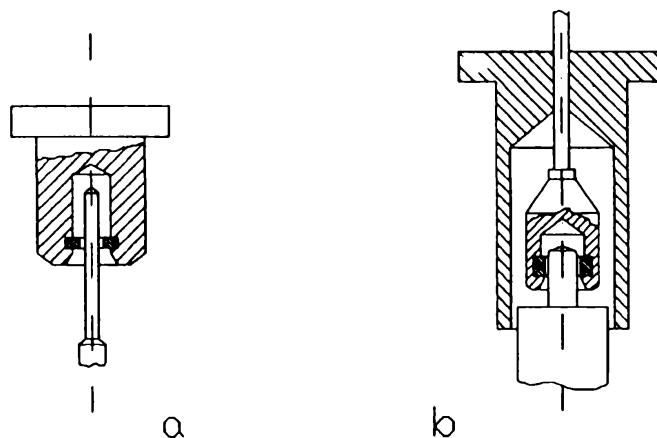


Fig. 3.38

În partea superioară se utilizează lagăre străpunse.

Pentru preluarea șocurilor radiale fusul axului este prelung, în formă de “trompetă”. În figura 3.38b se observă că fusul axului este normal, în schimb pentru a putea fi posibilă preluarea șocurilor radiale cuzinetul este montat elastic într-un suport sub formă de ac.

Lagărele pentru vârfuri pot funcționa și în poziție orizontală figura 3.39.

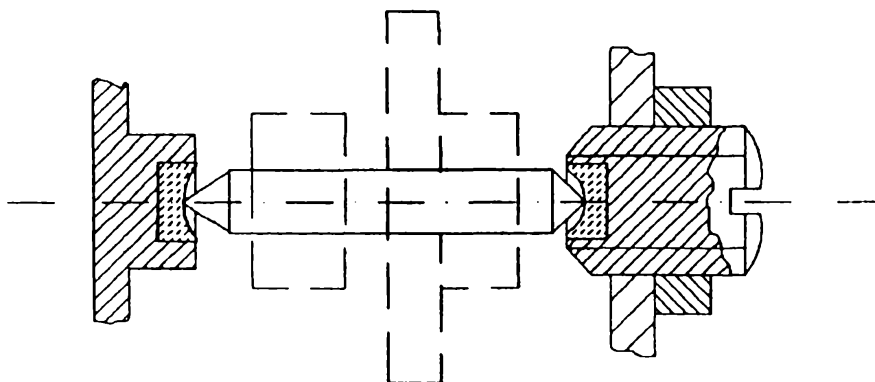


Fig. 3.39

Și aici se pune problema dilatării axului din cauza variațiilor de temperatură și există pericolul înțepenirii. Pentru a evita acest lucru, unul dintre lagăre este montat în interiorul unui știft filetat. Această soluție este frecvent utilizată pentru sprijinirea bobinelor mobile ale unor aparate de măsurat figura 3.40 unde vârfurile 2 sunt fixate de cadrul 1 al bobinei și sunt orientate spre exterior. În figura 3.41 este prezentată situația inversă când fusurile sunt orientate spre interior. Montajele prezentate în figurile 3.40 și 3.41 nu sunt prevăzute cu soluții de amortizare a șocurilor și vibrațiilor. Pentru amortizarea șocurilor și vibrațiilor se pot monta cuzineții conform soluției din figura 3.26c.

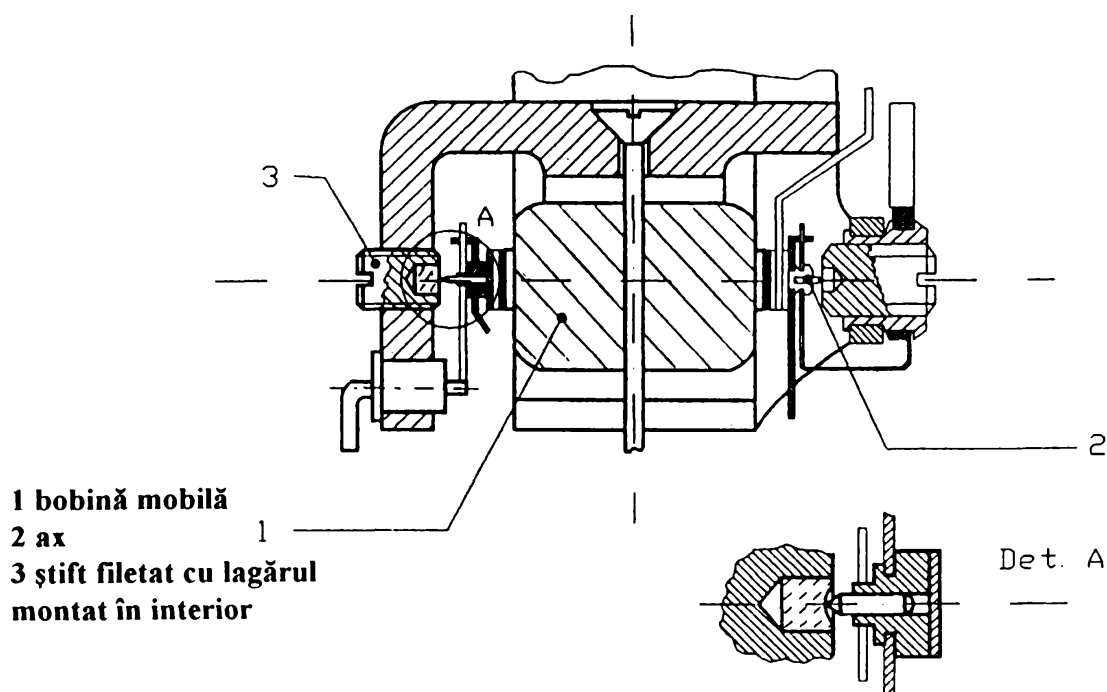


Fig. 3.40

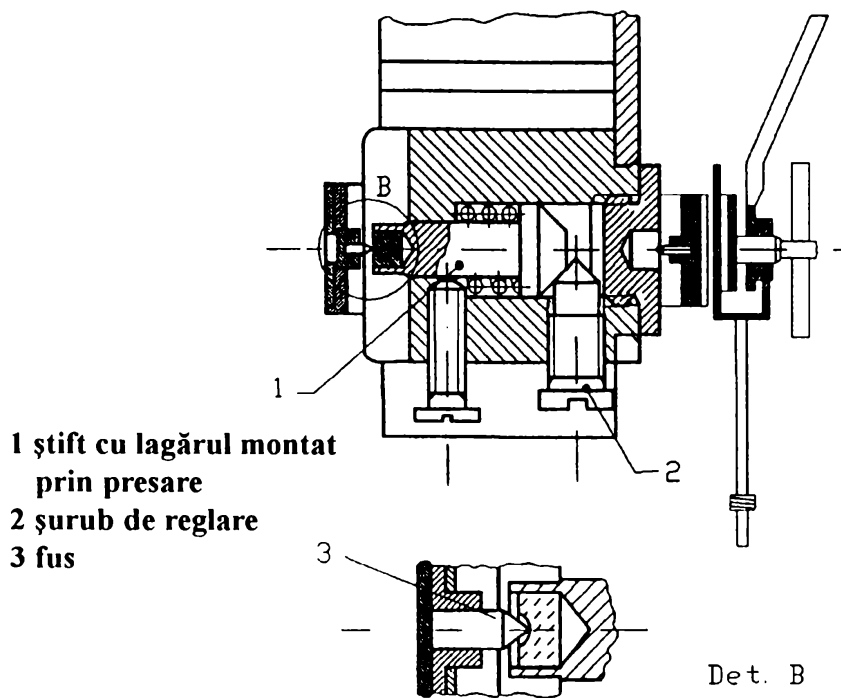


Fig. 3.41

3.2.3 Lagăre sferice din safire și rubine sintetice

Lagărele sferice se utilizează atunci când pe lângă mișcarea de rotație trebuie să se asigure pentru fus și posibilitatea de oscilație a axei sale.

Partea sferică a fusului se confecționează de cele mai multe ori din aceeași bucată cu axul. Uneori se folosește ca fus o bilă introdusă în ax prin presare sau menținută în ax prin magnetizare. Cuzinetul are formă sferică.

Soluțiile cu bilă liberă și cuzinet sferic, figura 3.42 reduc momentul de frecare, dar sunt mai instabile la acțiunea forțelor radiale.

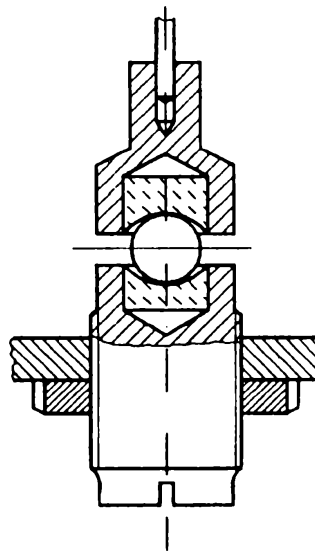


Fig. 3.42

Lagărele sferice sunt de tip deschis fiind necesară o forță pentru menținerea contactului între cele două elemente figura 3.43. Ele realizează o bună mobilitate unghiulară putând ocupa diferite poziții relativ dorite.

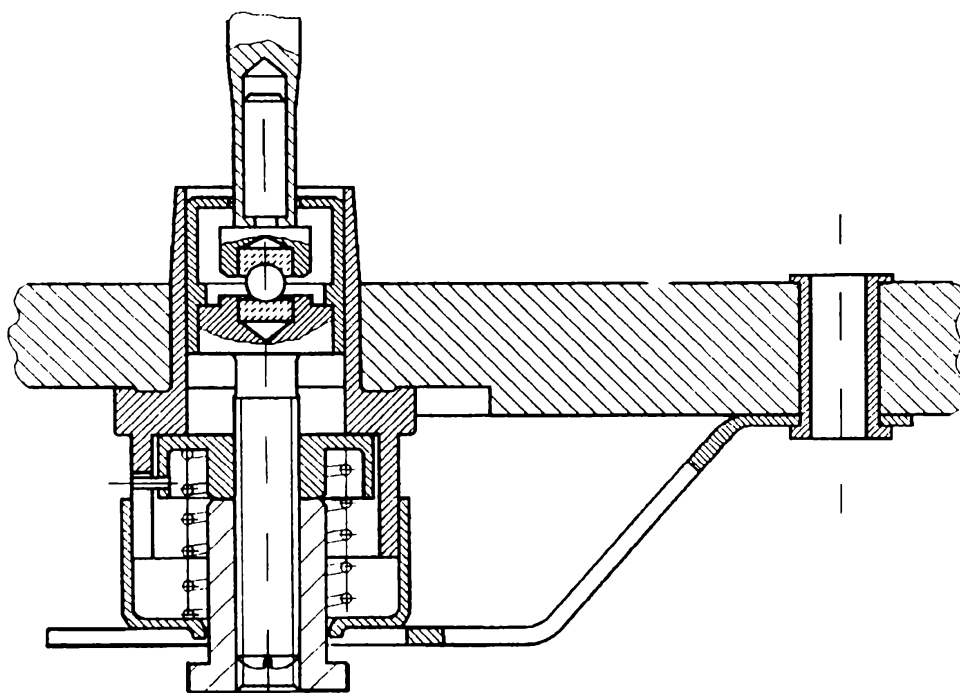


Fig. 3.43

4. Metode de creștere a monocristalelor de rubin și safir

Deși există numeroase metode de creștere ale safirelor și rubinelor artificiale, tehnica de tragere Verneuil este consacrată în întreaga lume pentru obținerea semifabricatului din care se fabrică ulterior lagărele din rubine și safire. [5], [7], [8], [9], [11], [12], [76], [77], [105]

4.1 Materia primă

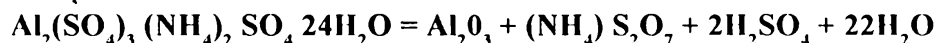
Safirul și rubinul sintetic au la bază corindonul, care reprezintă monocristale de oxid de aluminiu de foarte mare puritate, care cristalizează în sistem hexagonal. Cristalul pur de Al_2O_3 este incolor și se numește safir alb. Dacă se impurifică Al_2O_3 cu ioni de Cr^{3+} , se obține un monocristal de culoare roz închis care poartă numele de rubin. [3]

Pulberea de oxid de aluminiu folosită pentru obținerea monocristalelor de safir și rubin se caracterizează pe lângă gradul de puritate ridicat și printr-o densitate mică și o granulație foarte fină. Impuritățile prezentate în pulberea de oxid de aluminiu sunt nedorite pentru că ele generează apariția unor defecte în monocristalul final, manifestate prin: bule, incluziuni crăpături sau transparență scăzută. Duritatea redusă și granulație fină sunt necesare pentru a asigura topirea instantanee a pulberii de oxid de aluminiu.

Oxidul de aluminiu se obține din alaun amoniacal, sare dublă de sulfat de aluminiu și sulfat de amoniac: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

care are proprietatea de a fi foarte solubil la cald și foarte puțin solubil la rece.

Alaunul se supune calcinării cu scopul de a elimina componentele volatile, acidul sulfuric, amoniacul și apa, obținându-se astfel oxidul de aluminiu. Calcinarea are loc la temperatura de 1200 °C, iar odată cu creșterea temperaturii are loc topirea alaunului urmată de dizolvarea în propria apă de cristalizare, ceea ce conduce la obținerea unei omogenități ridicate:



Pulberea de oxid de aluminiu astfel obținută este sitată prin site vibratoare multiple obținându-se o pulbere extrem de fină, cu granule de ordinul micronilor, care servește în continuare la obținerea monocristalelor de safire și rubine sintetice.

Pentru obținerea safirelor sintetice pulberii de oxid de aluminiu i se adaugă 3% oxid de fier, iar pentru obținerea rubinelor sintetice, pulberea de oxid de aluminiu se amestecă cu oxid de crom 3%. Omogenizarea materiei prime se realizează prin simpla amestecare a componentelor oxidice.

Materia prima astfel obținută este depozitată de obicei la temperaturi joase pentru a se preveni absorbția apei din atmosfera. Pentru controlul pulberii de oxid de aluminiu se utilizează metode de investigație microscopică sau raze X.

4.2 Tehnica de tragere Verneuil

Tehnica de creștere a cristalelor prin metoda Verneuil, reprezintă un tip aparte de creștere din topitură, în care materialul se adaugă în mod continuu vârfului topit al cristalului și nu se utilizează creuzete pentru topitură.

Metoda a fost făcută publică de Verneuil în anul 1902.

O schemă sumară a ei este prezentată în figura 4.1.

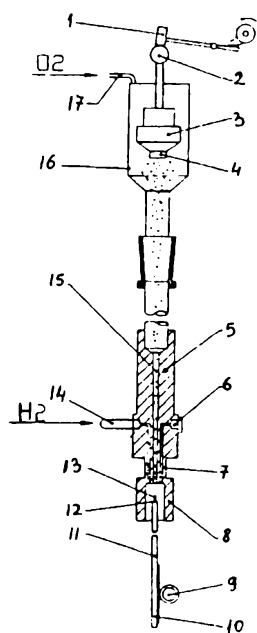


Fig. 4.1

Pudra din care se crește cristalul este depozitată într-un buncăr, de unde, prin intermediul unui sistem de alimentare cu vibrator, cantități mici din aceasta sunt introduse prin axul unui arzător în flacăra de hidrogen ce arde în prezența oxigenului. În drumul ei prin centrul arzătorului pulberea este încălzită, iar când trece prin flăcără se topește și în această stare cade pe un germen care este așezat în partea superioară a sistemului de tragere al cristalului. În urma contactului cu germenele, o parte din bolul de topitură se solidifică și astfel are loc creșterea. Menținerea frontului de cristalizare în aceeași regiune a izotermei de răcire se face prin coborârea controlată a cristalului.

Studiind figura 4.1 se observă că alimentarea cu oxigen a instalației Verneuil se face prin conducta 17, iar alimentarea cu hidrogen prin conducta 14. Pudra este conținută în buncărul 3, care este prevăzut cu sita 4. Ea este silită ritmic, datorită loviturilor intermitente ale ciocanului 1, care este acționat cu o camă. Oxigenul conduce materia primă prin pasajul central 15 al arzătorului vertical 5. Pasajul central 15 are formă conică, astfel încât limitează numărul de particule de pulbere care ajung în flacăra oxihidrică. Hidrogenul este introdus într-o cameră circulară de distribuție 6, de unde este condus spre partea inferioară a arzătorului vertical 7, prin mai multe canale care înconjoară canalul central prin care circulă oxigenul.

Flacăra oxihidrică se dezvoltă în partea inferioară a arzătorului în cuptorul 8.

Particulele de pudră din buncăr trecând prin această flăcără se topesc și cad pe germenele de cristalizare. Germenele de cristalizare 13 are aspectul unui ac subțire încastrat pe un suport ceramic 12, care este montat pe tija verticală 11. Bara de monocristal care crește trebuie coborâtă controlat, astfel încât porțiunea care crește să se afle în permanență în miezul flăcării oxihidrice. Pentru aceasta tija 11 este prevăzută cu o cremalieră 10, care angrenează cu pinionul 9. Pinionul este acționat mecanic prin intermediul unui motor electric.

Din studiul proprietăților mecanice ale monocristalelor de safir crescute la diferite orientări față de axele cristalografice, s-a constatat experimental că cele mai bune calități se obțin pentru cristale crescute la unghiurile $63^\circ - 68^\circ$, între axa optică și axa de creștere. În cazul creșterii monocristalelor de rubin se utilizează germeni de cristalizare având între axa optică și axa de creștere unghiurile $68^\circ - 73^\circ$. Germenele de cristalizare după ce a fost montat pe tija verticală este adus la punctul de topire, fiind introdus în nucleul flăcării oxihidrice. Creșterea bulei de cristal prin metoda Verneuil începe prin depunerea de pudră topită pe germenele de cristalizare topit. Când se atinge diametrul maxim realizabil pentru condițiile date, momentul sesizabil prin manifestări de instabilitate a zonei topite (clocotire, tendințe de scurgere) începe faza de creștere a cristalului prin reglarea corespunzătoare a debitului de pudră și a temperaturii flăcării. Temperatura flăcării va trebui să crească continuu din cauza pierderilor de căldură, care progresează pe măsura creșterii cristalului.

Când se atinge lungimea maximă realizabilă, moment sesizabil tot prin manifestări de instabilitate a zonei, se oprește alimentarea cu pudră, iar după câteva minute se închid brusc administrările hidrogenului și oxigenului, pentru a asigura o solidificare rapidă a zonei topite.

Ultima fază constă în menținerea cristalului în cuptorul de cristalizare 8 un timp convenabil, pentru a evita răcirea bruscă și deci tensionarea.

S-a observat că forma flăcării oxihidrice influențează forma secțiunii cristalului. De exemplu dacă flacăra oxihidrică are secțiunea radială eliptică, cristalul care crește are de asemenea secțiunea radială eliptică.

Prin metoda Verneuil clasică se obțin cristale de rubin sau safir în formă de bule a căror dimensiuni maxime sunt: diametrul între 12-15mm, iar lungimea până la 500-800 mm.

Pentru a crește cristale de safir de dimensiuni mai mari au fost elaborate o serie de variante ale tehnicii Verneuil. Astfel, au fost puse la punct tehnici Verneuil cu tragere orizontală a cristalului. Așezând germenele cristalin perpendicular pe axul arzătorului obținem varianta de tragere orizontală, în care germenele de cristalizare fiind rotit și ușor coborât se obține un disc monocristalin. Prin această tehnică au fost obținute discuri de safir cu o suprafață până la 180 cm². Instalația este prezentată în figura 4.2.

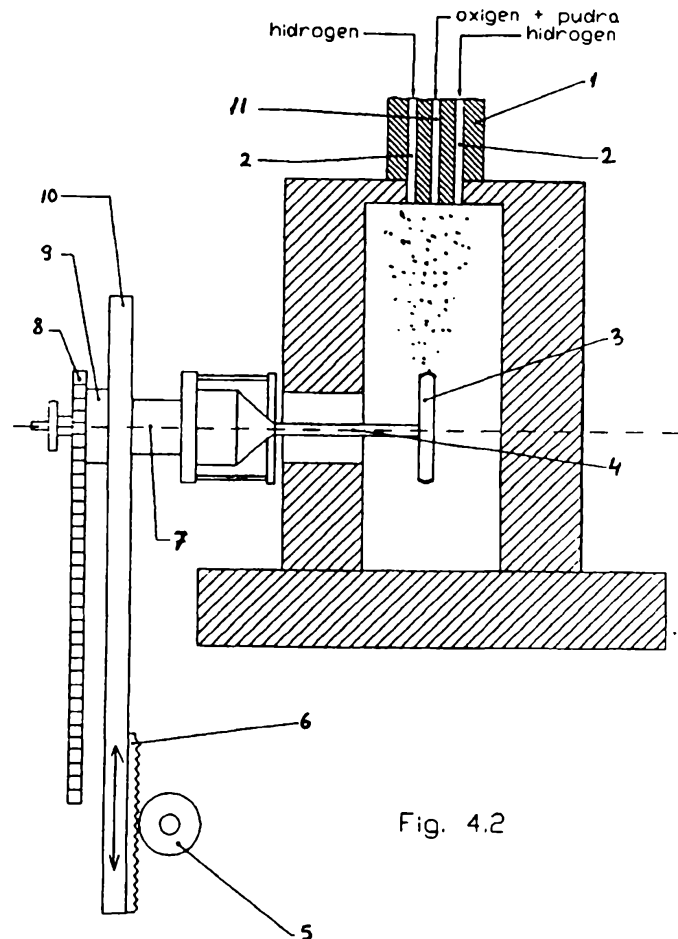


Fig. 4.2

Fig. 4.2

Se utilizează și în acest caz pulbere de oxid de aluminiu care cade dintr-un buncăr vibrator în flacăra oxihidrică în cantități foarte mici. Partea superioară a instalației, respectiv alimentarea cu materie primă, și construcția arzătorului oxihidric este identică cu cea din figura 4.1. Alimentarea cu oxigen se face prin canalul central 11, iar alimentarea cu hidrogen prin canalele 2, dispuse circular față de canalul central. Oxigenul și hidrogenul se amestecă în afara arzătorului, iar apinderea lor dă naștere unei flăcări îndreptate în jos cu temperatura ridicată, care topește pulberea antrenată de curentul de oxigen.

Spre deosebire de instalația din figura 4.1, această instalație are germenele de cristalizare montat pe o tijă orizontală 4. Când se pornește instalația, alimentarea cu pudră este oprită. După ce flacăra oxihidrică topește germenele de cristalizare, se deblochează alimentarea cu pudră, iar pudra topită se depune pe germenele de

cristalizare topit. Germenele de cristalizare se rotește progresiv, astfel încât pudra topită se depune pe toată suprafața lui exterioară, iar apoi este deplasat în jos pentru a se menține în permanență suprafața exterioară a discului 3 care crește pe germenele de cristalizare în nucleul flăcării oxihidrice. Grosimea discului depinde de lungimea germenului de cristalizare.

Dacă dorim să obținem discuri mai groase, pe lângă rotire și deplasare verticală, germenului de cristalizare trebuie să i se impună și o mișcare de oscilație.

Datorită tensiunilor interne foarte mari care apar în discurile crescute prin metoda Verneuil, este necesar ca aceste discuri să fie supuse ulterior unui tratament termic de detensionare. Tratamentul constă într-o încălzire a discurilor la o temperatură de 1900°C. Discurile sunt ținute la această temperatură minim două ore și apoi sunt răcite lent.

Orientarea cristalografică finală este determinată de orientarea cristalografică a germenului de cristalizare. La aceste discuri s-a observat experimental că este preferabil ca axa optică să fie perpendiculară pe axa de creștere și de aceea se utilizează un germene de cristalizare care respectă această orientare cristalografică.

Urmărind calitatea cristalelor de safire și rubine crescute prin metoda Verneuil se constată că pentru realizarea unei creșteri stabile, trebuie asigurată stabilitatea ratei de alimentare cu pulbere, a ratei de tragere a cristalului și a ratei de ardere a gazelor.

Deosebit de complexe sunt fenomenele care au loc în procesul alimentării cu pudră. Rata de alimentare cu pudră va depinde de cantitatea ei în buncăr și de tendința de aglomerare a pulberii. La rândul ei aglomerarea pulberii va depinde de forma buncărului, de dimensiunile particulelor ce compun pudra și de proprietățile electrostatice ale acesteia. În procesul alimentării în urma electrizării pudrei pot apărea depozite de pudră pe pereții interiori ai sistemului de alimentare. La un moment dat, sub acțiunea propriei greutate, aceste depozite se desprind și cad pe pelicula de topitură de la suprafața cristalului. Din cauza timpului scurt de topire și a grosimii mici a frontului de cristalizare, particule de pudră incomplet topite ajung la interfața solid-topitură și vor fi înglobate în cristal sub formă de incluziuni. În acest proces pot fi înglobate și bule de gaz în masa cristalului.

S-a constatat că pentru a asigura o rată de alimentare constantă cu pudră, o importanță deosebită o are mărimea granulelor a căror diametru este aproximativ 20μm precum și puritatea amestecului. Viteza de coborâre a cristalului care crește, trebuie să fie corelată cu rata de alimentare cu pulbere, astfel încât frontul de cristalizare să fie menținut constant în nucleul flăcării oxihidrice.

Instalațiile Verneuil moderne pot fi dotate cu sisteme de automatizare a tehnicii de tragere, astfel poziția frontului de cristalizare poate fi controlată cu doi senzori fotoelectrici, unul pentru mecanismul de alimentare cu pulbere și celălalt pentru mecanismul de coborâre, iar imaginea bulei incandescente poate fi studiată pe o cameră video. Pentru menținerea presiunii constante a celor două gaze: oxigen și hidrogen, instalațiile moderne sunt dotate cu regulatoare automate. Cele două gaze trebuie să fie deasemenea și foarte pure.

Un dezavantaj al flăcării oxihidrice este valoarea mică a coeficientului de radiație termică; urmare acestui fapt căldura ajunge la regiunea superioară a cristalului numai pe seama conducției termice. Valoarea coeficientului de radiație termică fiind mare pentru cristal, căldura va fi dispersată în primul rând prin radiație, ceea ce face ca temperatura sub pelicula de topitură să scadă brusc, conducând la un gradient axial de temperatură foarte abrupt. Gradientul radial de temperatură este aproximativ constant deoarece temperatura flăcării oxihidrice în plan radial este aproximativ aceeași. Prezența gradientului axial de temperatură foarte abrupt, conduce la apariția tensiunilor termice, ce vor reprezenta sursa principală pentru dislocații. Aceste dislocații s-au dovedit a fi

sursa câmpurilor de rotație din interiorul rețelei cristaline, producând astfel o alterare a structurii cristaline ideale prin apariția blocurilor de mozaic figura 4.3.

Structura de mozaic apare în procesul creșterii cristalelor, chiar în condițiile folosirii de germeni de cristalizare fără defecte. Odată cu modificarea temperaturii apar, datorită dilatații termice diferite a blocurilor de mozaic, "tensiuni de mozaic" locale care influențează formarea fisurilor. Fisura formată se propagă în continuare datorită tensiunilor interne inițiale.

În concluzie, la cele prezentate până acum, se poate afirma că tehnica Verneuil de trageră a monocristalelor de safire și rubine este avantajoasă prin următoarele: absența creuzetului în procesul tragerii elimină o serie de probleme complexe legate de interacțiunea chimică topitură - creuzet și de apariția tensiunilor interne datorită influenței pereților creuzetului; aparatura necesară este relativ simplă din punct de vedere constructiv, iar cristalele au un preț de producție scăzut deși randamentul de obținere al cristalelor este de 50 - 60 %, iar randamentul de conversie al pudrei în cristal de aproximativ 60 %.

Un operator poate deservi în același timp un banc de 50 de instalații tip Verneuil. Unul din principalele neajunsuri ale procedurii Verneuil constă în faptul că perturbarea formării cristalului ajunge la operator numai după ce

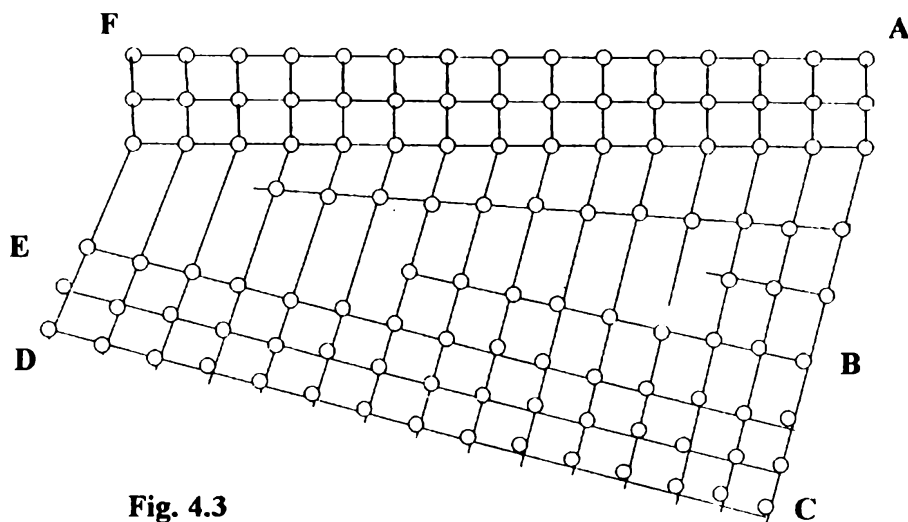


Fig. 4.3

cristalul s-a dezvoltat într-o neregularitate geometrică mai mare. Chiar dacă operatorul acționează apoi în sensul remedierii, el nu poate înlătura defectul deja apărut. Cristalul astfel obținut va prezenta imperfecțiuni cristalografice pentru că este aproape sigur că malformațiile macroscopice ale bulei de creștere sunt legate de imperfecțiuni cristalografice.

Alt inconvenient al metodei Verneuil constă în faptul că se obțin cristale puternic tensionate, prezentând din această cauză structuri de mozaic, limite de granule, dislocații, incluziuni, bule de gaze și alte defecte care înrăutățesc calitățile mecanice și optice.

Cu toate aceste neajunsuri metoda Verneuil este utilizată în lumea întreagă pe primul loc, pentru obținerea cristalelor de safire și rubine artificiale ca materie primă pentru fabricarea lăgarelor în mecanica fină.

5. Tehnologia de prelucrare a lagărelor din safire și rubine artificiale

5.1 Tehnologia de prelucrare a lagărelor plane din safire și rubine sintetice.

Studiind formele atât de variate ale lagărelor din safire și rubine sintetice prezentate în capitolele precedente, precum și analizând dimensiunile extrem de reduse ale acestora se deduce că tehnologia de prelucrare a acestor lagăre este foarte diversificată, adaptată fiecărui tip de lagăr în parte.

Tehnologiile de prelucrare vor utiliza în exclusivitate ca material abraziv diamantul și se vor aplica procedee neconvenționale de lucru: laser și ultrasunet.

Calitățile pietrelor tehnice și condițiile de precizie severe impuse lagărelor prelucrate din rubine și safire sintetice fac ca tehnologia lor să se apropie foarte mult de cea a pieselor optice, deosebirile provenind din modul de realizare a operațiilor caracteristice dimensiunilor foarte mici ale lagărelor.

Ca materie primă pentru lagărele de safir și rubine artificiale se folosesc atât la noi în țară cât și în străinătate monocristalele crescute prin tehnica Verneuil. Deși calitatea unui cristal crescut prin tehnica Verneuil nu este impecabilă și deși randamentul de conversie al pudrei în cristal este de 60%, totuși tehnica Verneuil rămâne avantajoasă pentru cantități mari de cristal, la un preț de cost redus.

După cum s-a arătat în capitolul 1, rubinul și safirul cristalizează în sistem hexagonal. În urma cercetărilor experimentale s-a stabilit că proprietățile monocristalelor de safir și rubin depind de unghiul ρ - unghiul pe care îl face axa de creștere \bar{w} cu axa cristalografică \bar{c} figura 5.1a.

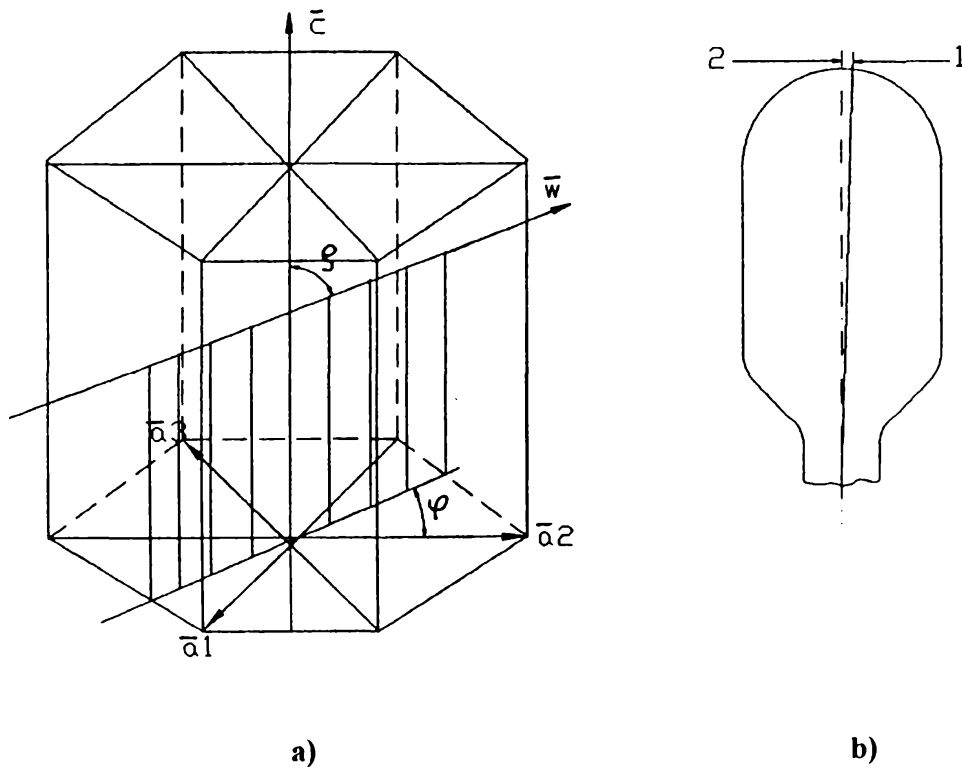


Fig. 5.1

Astfel, la safir acest unghi ρ are valoarea cuprinsă între 63° și 68° , iar la rubin valoarea acestui unghi este cuprinsă între 68° și 73° .

Germenele de cristalizare este astfel montat în tija suport, încât să se respecte unghiul ρ . Studiind monocristalele de safir și rubin crescute prin metoda Verneuil se observă că unghiul ρ corespunzător germenului de cristalizare se găsește și în orientarea cristalografică a cristalului final.

Pentru a studia modul cum se respectă în semibula de safir unghiul dintre axa de creștere și axa optică, impus de germenele de cristalizare, s-a făcut un experiment simplu.

S-au pregătit din semibule crescute după metoda Verneuil 40 de germeni de cristalizare cu următoarele unghiuri între axa de creștere și axa optică: 60° , 65° , 70° și 75° , deci pentru fiecare valoare a unghiului ρ , s-au pregătit câte 10 germeni de cristalizare.

Apoi s-au obținut 40 de bule de safir crescute cu ajutorul acestor germeni, după metoda Verneuil.

Despicând bulele după planul de clivaj s-au obținut 80 de semibule.

Cu ajutorul microscopului de polarizare s-a stabilit unghiul dintre axa de creștere și axa optică pentru semibulele studiate. Se observă că acest unghi respectă perfect unghiul ρ introdus de germenele de cristalizare. Deci s-au regăsit unghiurile 60° , 65° , 70° și 75° .

Axa de creștere a semibulei este trasată manual cu un creion roșu. Semibula având o formă neregulată este posibil ca axa de creștere să fie înclinată cu $1^\circ - 2^\circ$ față de poziția reală figura 5.1b.

Axa optică se stabilește cu ajutorul microscopului de polarizare. Pe masuța orientabilă gradată se fixează semibula cu axa de creștere trasată manual cu creionul roșu. Se studiază semibula de safir în lumină polarizată între nicoli încrucișați. Se rotește masa microscopului până ce se observă un plan întunecat, care este planul de extincție corespunzător axei optice. Se trasează și axa optică cu creionul.

Datorită metodei destul de neprecisă de stabilire a axei de creștere, vezi figura 5.1b, uneori la microscopul de polarizare se citesc valori de 61° sau 74° pentru unghiul ρ .

Observație: din cele 40 de bule de safir studiate, 6 s-au despicat necorespunzător devenind rebuturi.

S-a studiat și în acest caz unghiul dintre axa optică și axa de creștere, care era același cu cel impus de germenele de cristalizare.

Concluzia este că spargerea cristalului după alt plan decât cel de clivaj și deci apariția rebuturilor se datorează tensiunilor interne care apar în timpul creșterii cristalului.

La prelucrarea lagărelor din safire și rubine artificiale se ține seama de proprietățile fizice ale corindonului, în special faptul că este anizotrop. Datorită anizotropiei, suprafețele cristalului paralele cu axa optică sunt mult mai dure, față de suprafețele cristalului perpendiculare pe axa optică. Acest lucru este pus în evidență de rezistența la încovoiere a lamelor de safir netratate termic care este 5,8 MPa pentru încărcări perpendiculare pe axa \bar{c} și 3,8 MPa pentru încărcări paralele cu axa \bar{c} . Din acest motiv, se marchează cu grijă planul care conține axa optică și se ține seama de orientarea axei optice \bar{c} , în toate etapele intermediare de prelucrare a lagărelor de safire și rubine artificiale. În lagărul final, reacțiunile care apar în timpul funcționării sunt orientate în totdeauna perpendicular pe axa optică. De aceea, în funcție de poziția de funcționare a lagărului, axa optică c poate fi paralelă cu axa de simetrie a lagărului sau perpendiculară pe axa de simetrie a lagărului. [98]

În cazul lagărelor străpunse sau al lagărelor pentru vârfuri care funcționează în poziție orizontală, axa optică va avea orientarea paralelă cu axa de simetrie a lagărului figura 5.2 și 5.3.

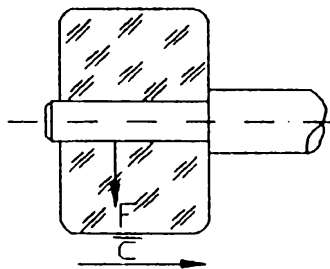


Fig. 5.2

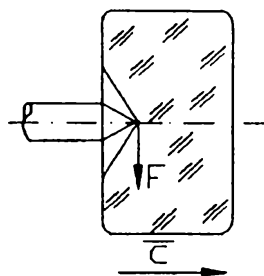


Fig. 5.3

În cazul lagărelor pentru vârfuri care lucrează în poziție verticală sau a lagărelor sferice, axa optică este orientată perpendicular cu axa de simetrie a lagărului figura 5.4 și 5.5.

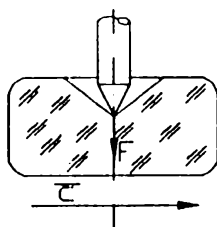


Fig. 5.4

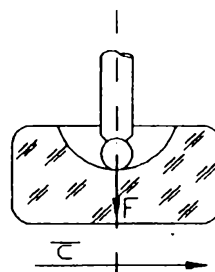


Fig. 5.5

O altă proprietate fizică a corindonului pe care se bazează tehnologia de prelucrare a lagărelor din safire și rubine artificiale este clivajul. Clivajul este consecința imediată a existenței planelor cristalografice sau mai precis a existenței unui aranjament spațial stratificat în cristal. Cristalele cliveaza mai ușor după planele cu densitate de noduri (atomi) mai mare, deoarece distanța între aceste plane este mai mare și ca rezultat energia de legătură este mică, ceea ce înseamnă că planele se pot ușor separa: forța necesară pentru separarea acestor plane este mai mică decât pentru alte plane. La corindon planul de clivaj este planul care conține axa optică și axa de creștere. [104]

Măsurând energia de despicăre pentru diferite direcții cristalografice, s-a constatat că pentru despicărea după planul care conține cele două axe - optică și de creștere - energia necesară este de 60 J/m^2 , în timp ce pentru despicărea monocristalului după plane perpendiculare pe axa de creștere energia necesară depășește 400 J/m^2 .

Bulele de safire și rubine crescute prin metoda Verneuil și care reprezintă semi-fabricatul utilizat în obținerea lagărelor, se despică în două semicristale datorită proprietății de clivaj. Despicărea se realizează pe o mașină de despăcat, care are o concepție simplă prezentată în figura 5.6, în care:

1 - motorul electric de la care prin transmisia cu curele 2, mișcarea se transmite la discul diamantat 3

5 - prisma pe care este ghidat semicristalul 4 în timpul despăcării

6 - sistemul de alimentare cu lichid de răcire

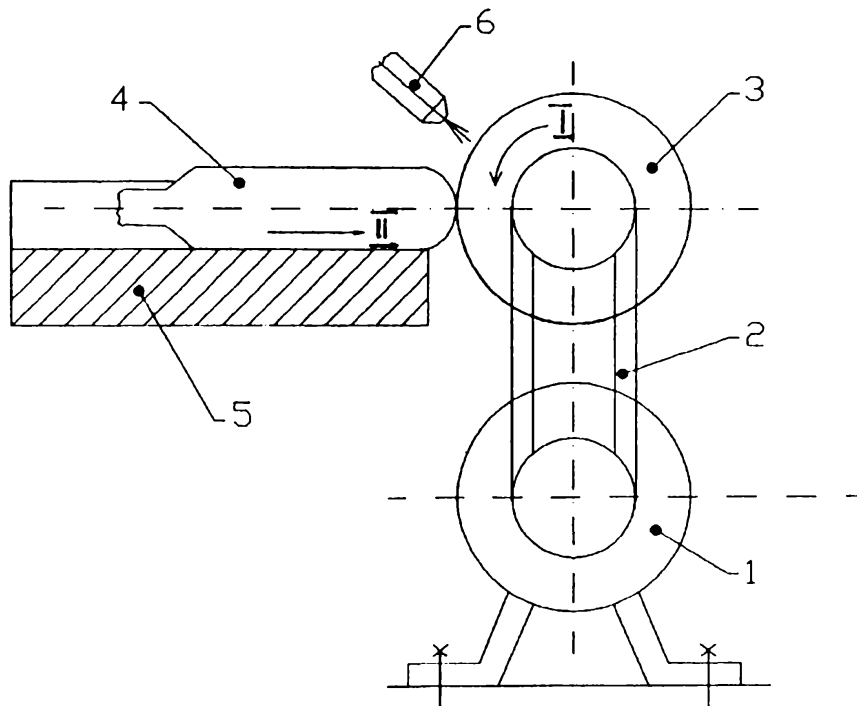


Fig. 5.6

Studiind bula de cristal crescută prin procesul Verneuil se observă cu ochiul liber un plan ușor întunecat. Este planul de clivaj care conține axa optică și axa de creștere și care datorită unei densități mai mari a atomilor apare ușor opac. Bula de semicristal este astfel orientată în jgheabul 5, încât planul de clivaj să fie în același plan cu discul 3. Mișcarea de rotație I executată de discul 3 are drept scop efectuarea unei ușoare crestături la capătul bulei. Semicristalul este deplasat manual în direcția II și după circa 3 - 4 secunde de la contactul cristal - disc, acesta se despică în două semibule datorită fenomenului de clivaj. Clivajul produce o pereche de suprafețe relativ netede, deoarece cristalul nu se despică perfect de-a lungul planului geometric, clivajul fiind influențat negativ de prezența tensiunilor interne și a defectelor din rețeaua cristalină.

Semibulele se debitează în continuare pe mașini de debitat cu discuri diamantate - distanța între ele fiind în funcție de tipodimensiunile viitoarelor lagăre. În vederea debitării, semibulele se lipesc pe plăci de sticlă cu ajutorul unui adeziv - mastic amestec conținând 50% ceară roșie și 50% colofoniu. Lipirea semibulei pe placa de sticlă se face astfel încât axa optică să fie paralelă cu avansul figura 5.7. Semibulele marcate ca în figura 5.7 sunt lipite cu mastic pe plăci de sticlă speciale. Se lucrează în permanență pe mese de metal încălzite ușor cu rezistențe electrice, astfel încât masticul să se pastreze în permanență moale. [29], [35]

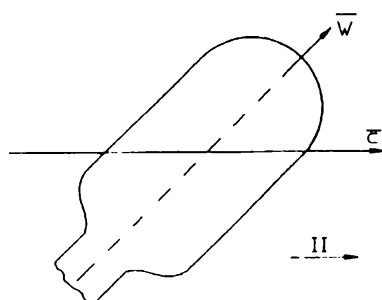


Fig. 5.7

Mașina de debitat are o construcție relativ simplă, prezentată în figura 5.8.

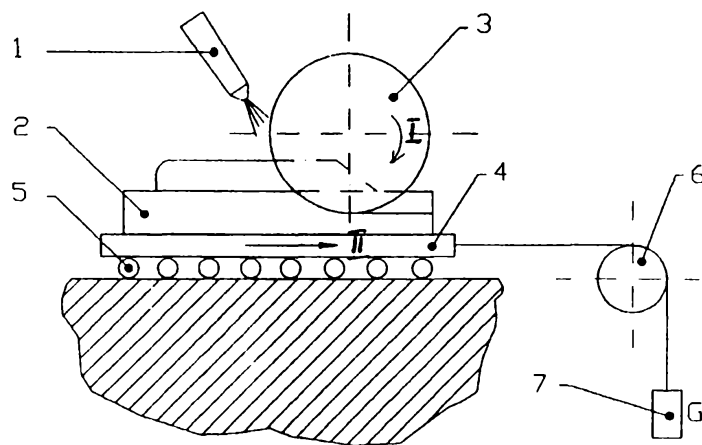


Fig. 5.8.

Placa de sticlă cu semifabricatul 2 este fixată pe masa 4 care ghidează pe bilele 5 fiind deplasată sub acțiunea contragreutății 7. Greutatea 7 este legată de un cablu și susținută pe rola 6. Lichidul de răcire este dirijat de duza 1 în zona - interacțiune discuri - semicristal și este format din petrol și ulei în amestec. Mișcarea de așchiere I realizată de discurile diamantate este de 5200 rot/min. Conform figurii 5.9, discurile diamantate 1 sunt fixate prin strângere între flanșele 2, pe axul 3 și sunt distanțate între ele prin distanțieri de oțel 4, interschimbabili.

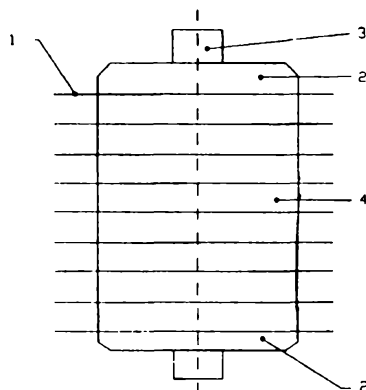


Fig. 5.9

După terminarea operațiunii de debitare, feliile se dezlipesc prin topirea masticului. În urma fiecărei faze de prelucrare, semifabricatele se spală cu apă și sodă caustică pentru a se curăța adezivul folosit la lipire.

Feliile de formă circulară se șlefuiască grosier pe o masă de șlefuit cu ax vertical. În scopul șlefuirii feliile se lipesc pe un disc de metal $\phi 90 \times 5$, ca în figura 5.10.

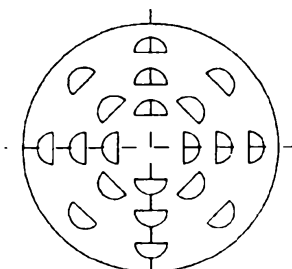


Fig. 5.10

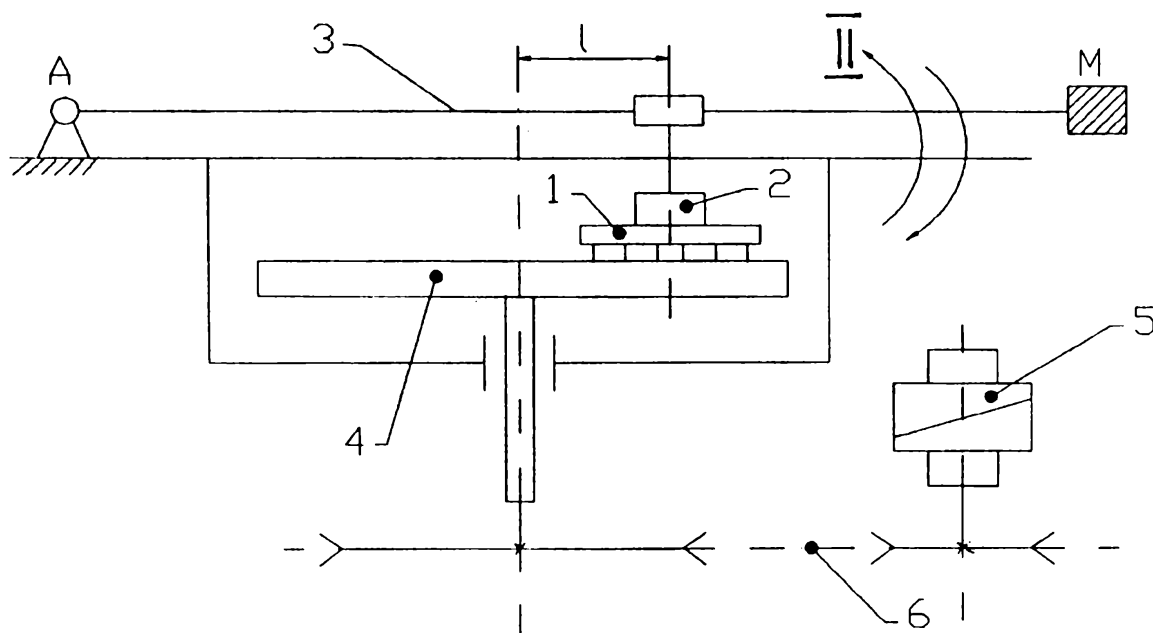


Fig. 5.11

Mașina de șlefuit cu ax vertical are schema de principiu din figura 5.11.

Mașina este prevăzută cu un disc de fontă 4, care este striat pentru a menține prin imprimare în stratul superficial granule de carbură de siliciu M 20, cu care se lucrează. Din când în când, se unge cu o perie discul 4, cu o pastă groasă care reprezintă carbura de bor în suspensie în apă. Mișcarea de rotație I a discului este realizată prin intermediul motorului 5 și a transmisiei prin curele 6. Mișcarea oscilanta II a brațului 3 se obține manual, el fiind antrenat de operator de mânerul M. Datorită mișcării oscilante II a brațului 3 articulată în A și a plasării excentrice cu valoarea l a plăcii de metal 1 cu feliile lipite pe ea apare și mișcarea de rotație III a piesei 2 împreună cu discul 1. În acest fel, are loc așchierea și deci îndepărtarea adaosului de prelucrare până când cota peste sticlă și felii măsurată cu ajutorul micrometrului este cea cerută de documentația tehnologică.

Operația de debitare continuă prin debitarea feliilor de formă semirotundă în fâșii dreptunghiulare. Pentru ca risipa de material să fie cât mai mică, feliile se lipesc pe plăci de sticlă astfel încât dimensiunea maximă obținută la debitarea în felii să fie paralelă cu direcția de avans II a mesei mașinii de debitat figura 5.12.

În continuare fișile dreptunghiulare se debiteză în pătrate. Modul de lipire al fâșiilor pe sticlă în vederea debitării este redat în figura 5.13.

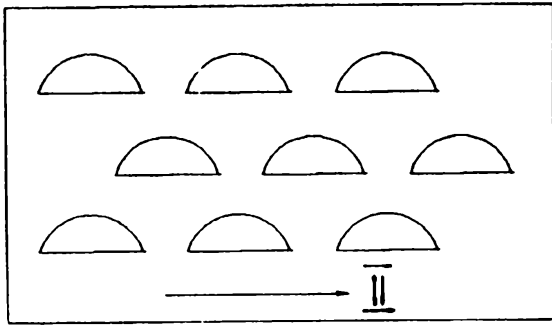


Fig. 5.12

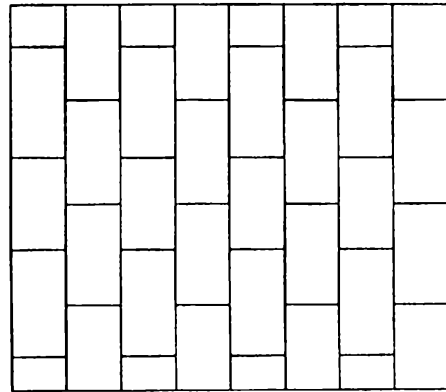


Fig. 5.13

În urma fiecărei faze de prelucrare semifabricatele se spală cu apă și cu sodă caustică, pentru a se curăța de adezivul folosit la lipire.

Discurile diamantate folosite la debitarea semifabricatului în felii semicirculare și la debitarea feliiilor în fâșii dreptunghiulare sunt de același tip.

Discurile pentru debitat sunt formate dintr-o parte activă abrazivă și un corp pe care este fixat abrazivul. [97]

Structura părții abrazive este formată din granule de diamant artificial, înglobate într-o masa de liant. Corpul are forma unui disc cu secțiune constantă, se confecționează din tablă de oțel electrotehnic silicios și este prevăzut cu un alezaj de prindere pe axa mașinii de debitat.

Discurile de debitat cu diamant artificial și liant metalic au partea inelară cu secțiune dreptunghiulară figura 5.14.

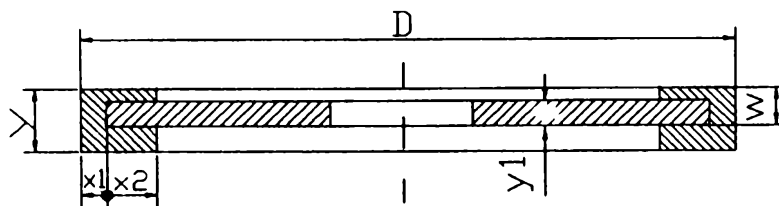


Fig. 5.14

$y = 0,75 \div 0,8$ mm la discurile utilizate pentru debitarea semifabricatului în felii semicirculare

$y = 0,35 \div 0,5$ mm la discurile utilizate pentru debitarea feliiilor în fâșii dreptunghiulare

$y_1 = 0,1 \div 0,125$ mm

$W = 0,6 \div 1,0$ mm

Diametrul D are valoarea 140 mm.

Straturile frontale au dimensiunile:

$X_1 = 2,5$ mm

$X_2 = 1,5$ mm

Pentru granulele abrazive se utilizează pulberi de diamant sintetic sau natural, metalizate sau nemetalizate.

În practica industrială sunt folosite două sorturi de pulberi de diamant:

- pulberi alungite de formă neregulată
- pulberi rotunjite "blocky" de formă regulată

Dintre acestea, pulberile “blocky” se utilizează la confecționarea discurilor cu liant metalic, deoarece nu se sparg ușor și datorită aderenței bune la masa de liant, sunt reținute un timp mai îndelungat în strat, chiar după uzura vârfulor lor așchietoare, astfel ca cele dispuse pe suprafețele frontale ale discului vor netezi materialul, îmbunătățind calitatea suprafeței obținute prin debitare.

Granulele de diamant acumulează foarte ușor căldura generată în procesul de așchiere. Aceasta poate influența viața granulelor, astfel că se impune disiparea acestei călduri acumulate. În acest scop, granulele se metalizează, cămașa metalică ce le îmbracă preluând căldura acumulată de granule și transferând-o în masa de liant, în lichidul de răcire sau mediul ambiant.

Capacitatea de așchiere a granulelor este direct proporțională cu mărimea lor. Randamentul prelucrării crește odată cu creșterea granulației. De asemenea, randamentul prelucrării crește, cu cât concentrația în abrazivi a discului așchietor este mai mare, existând însă valori limita peste care randamentul scade, tabelul 1, aceasta deoarece la o cantitate prea mare de abraziv cuprinsă în partea activă a discului, procesul de prelucrare a materialului din zona de așchiere este înlocuit cu un proces de tasare a acestuia.

Concentrația [%]	Randament volumetric
50	22
75	50
100	75
125	80
150	90
175	95
200	78

Tabelul 1

Concentrația de abraziv se exprimă în procente: astfel, pentru concentrație de 100 % este stabilit un conținut de 4,4 carate de pulbere abrazivă - într-un cm^3 de strat abraziv ceea ce reprezintă circa 25 % din volumul său.

Pentru debitarea materialelor dure cum sunt cristalele de safir și rubin artificial, se folosesc în exclusivitate lianți metalici. Aceștia sunt caracterizați printr-o uzură redusă datorită durtății lor ridicate și asigură o înaltă utilizare a pulberilor abrazive. Consumul de abraziv al discurilor cu lianți metalici este de 2-3 ori mai scăzut față de cel al discurilor cu lianți organici.

Înglobarea granulelor abrazive în lianți metalici, se face prin două procedee:

- procedeul de sinterizare
- procedeul depunerii electrochimice

Lianții sinterizați cei mai folosiți la confecționarea discurilor pentru debitat materiale dure, sunt pe baza de bronz, oxid de fier, pulbere de staniu și argint. Acești lianți prezintă o foarte bună conductibilitate termică și asigură un transfer bun al căldurii.

Alegerea corespunzătoare a liantului metalic utilizat la fabricarea discurilor pentru debitat monocristale de rubine și safire, prezintă o importanță deosebită, întrucât în timpul procesului de prelucrare trebuie să se realizeze un echilibru dinamic între viteza de uzură a liantului și viteza de uzură a materialului abraziv în vederea unei autoascuțiri corespunzătoare a suprafeței așchietoare a discului de debitat.

În acest fel se asigură o uzură minimă a discului de debitat, o productivitate ridicată a debitării și o calitate superioară a suprafeței prelucrate.

Liantul utilizat nu trebuie să vină în contact direct cu materialul de debitat. Pentru aceasta este necesară alegerea corectă a liantului astfel ca uzura acestuia să fie egală sau foarte apropiată de uzura abrazivului.

$$\text{Raportul } V = \frac{\text{viteza de uzura a liantului}}{\text{viteza de uzura a abrazivului}}$$

trebuie să aibe valori cuprinse între 1 și 1,1. Dacă $V > 1,1$ crește uzura discului raportată la volumul de material prelevat. Dacă $V < 1$, scad proprietățile așchietoare ale sculei, fiind necesare reascuțiri repetate care ridică costul prelucrării datorită productivității scăzute și a consumului ridicat de discuri.

Pentru alegerea corespunzătoare a liantului metalic se studiază uzura liantului în procesul de prelucrare. Mecanismul uzurii liantului se deosebește fundamental de mecanismul uzurii abrazivului, întrucât granula abrazivă acționează ca o sculă așchietoare având unghiul de degajare negativ, în timp ce uzura liantului, respectiv a matricei metalice se produce atât prin abraziune datorită frecării cu materialul de prelucrat, precum și prin smulgere odată cu îndepărtarea granulelor abrazive sub acțiunea forțelor de așchiere care solicită discul de debitat.

Tehnologia de fabricație a discurilor diamantate cu liant metalic obținute prin sinterizare, prevede dozarea, amestecarea și omogenizarea granulelor abrazive cu pulberi metalice utilizate, după care urmează presarea la rece a acestora într-o matriță urmată de o încălzire corespunzătoare la temperatura de sinterizare determinată în principal de compoziția liantului metalic utilizat.

Gradul de omogenizare al amestecului are o influență deosebită asupra proprietăților de așchiere a discurilor de debitat. În funcție de el rezultă uniformitatea pasului de așchiere a suprafeței active a discului, considerat ca medie a distanței dintre două granule succesive în direcția mișcării de așchiere. La abaterile mari de la această mărime statică, dacă pasul local este mai mic, cea de a doua granulă nu participă deloc sau participă ne semnificativ la așchiere, iar dacă este mai mare crește zona și presiunea de contact de frecare între obiectivul de prelucrat și liant.

În urma cercetărilor experimentale s-a observat că procentul de 63% pulbere de liant metalic și restul pulbere de diamant abraziv este cel mai bun. Această omogenitate însă, se obține greu datorită diferenței dintre greutatea specifică a diamantului și a liantului utilizat. De asemenea, suprafețele netede ale granulelor abrazive constituie o dificultate în procesul de omogenizare.

Din cercetările experimentale efectuate s-a ajuns la concluzia că omogenizarea cea mai bună se obține prin agitarea manuală a amestecului într-un recipient de sticlă.

Următoarea etapă tehnologică în obținerea discurilor diamantate prin sinterizare este presarea de compactizare.

Presarea de compactizare trebuie astfel realizată încât presiunea maximă aplicată să nu depășească rezistența de rupere la compresiunea admisă pentru materialul abraziv utilizat. Presiunea de compactizare este limitată la valoarea de 500 MPa pentru protejarea matriței împotriva spargerii.

Matrița utilizată la presarea de compactizare este prezentată în figura 5.15.

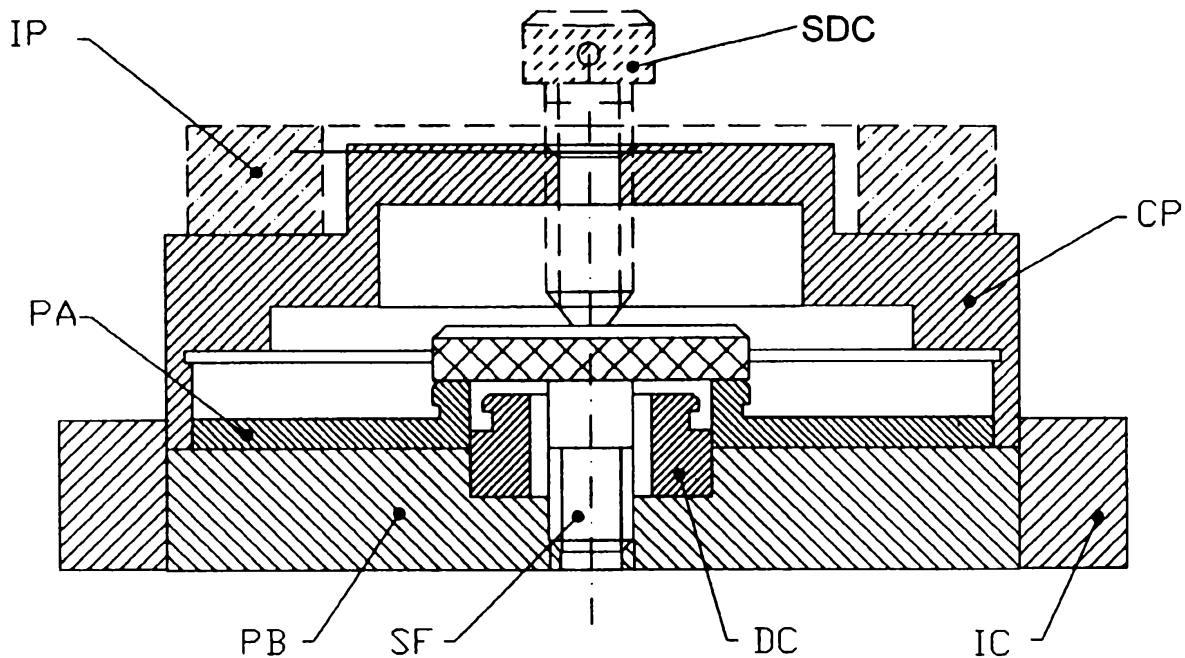


Fig. 5.15

Placa de bază PB are diametrul exterior identic cu diametrul discului presat, $\Phi 140$. Dornul de centrare DC, este centrat în placa de baza, PB, prin ajustaj intermediar. Diametrul exterior al dornului de centrare coincide cu diametrul alezajului discurilor presate ($\Phi 42$).

Inelul de centrare IC, realizează un ajustaj intermediar cu placa de baza și clopotul de presare, CP.

Placa de apăsare PA este destinată menținerii poziției corecte a suportului metallic. Placa de apăsare delimitează împreună cu inelul de centrare IC, dimensiunea radială a zonei active a discurilor presate. În spațiul cuprins între placa activă PA și inelul de centrare se dispune amestecul omogenizat de pulberi metalice și material abraziv.

Clopotul de presare CP este prevăzut cu posibilitatea recondiționării prin rectificarea suprafeței care presează amestecul omogenizat.

Șurubul de fixare SF apasă prin strângere placa de apăsare PA, pe suportul metallic al discului. Prin SDC, s-a notat șurubul de deblocare al clopotului de presare, care este prevăzut cu o extremitate conică de apăsare într-un locaș conic de pe suprafața șurubului de fixare.

Inelul de presare IP, face parte din platoul mobil al presei hidraulice. Acest inel se reazamă pe clopotul de presare, CP, în zona de maximă rigiditate pentru ca deformarea clopotului de presare să fie minimă în timpul presării. După efectuarea presării, în vederea extragerii inelului de centrare, se așază inelul de presare, IP, sub placa de bază, PB, și se presează inelul de centrare până la extragerea sa completă.

După operația de presare de compactizare, urmează operația de încălzire.

Încălzirea discului prevăzut pe suprafața activă cu amestecul abraziv și liant metallic presat, se efectuează la temperaturi determinate de liantul metallic utilizat

$$\theta_{\max} = (0,8 \div 0,85) \theta_{TA}, \text{ unde } \theta_{TA}$$

reprezintă temperatura de topire a amestecului.

În urma sinterizării, granulele abrazive trebuie să își păstreze forma geometrică și proprietățile inițiale.

Eficacitatea procesului de sinterizare depinde de natura liantului, de gradul de oxidare a acestuia în momentul sinterizării, de granulația materialului abraziv, de gradul de deformare și compactitatea materialului după presare. Recristalizarea matricei metalice începe în jurul unor centre de recristalizare localizate în zonele cu un grad înalt de deformare unde energia de activare locală a ionilor metalici are valori ridicate ca urmare a densității mari de dislocații și a aglomerării defectelor punctiforme la limita dintre grăunți. Difuziile atomilor pe suprafața granulelor și apoi în adâncime restaurează rețeaua cristalină și transformă punțile aderente în legături de continuitate cristalină. Corespunzător se mărește compactitatea stratului presat și se îmbunătățesc proprietățile mecanice ale acestuia.

Sinterizarea în cuptoare electrice se desfășoară conform graficului din figura 5.16.

Discurile, cu stratul activ presat, se montează într-un dispozitiv, fiind distanțate cu folii din tablă din oțel inoxidabil, se strâng axial și se așează într-un recipient din tablă care se umple cu cărbune din lemn. Se încălzește până la 760°C, se mențin timp de două ore la această temperatură și apoi se lasă în cuptor să se răcească până la 250°C.

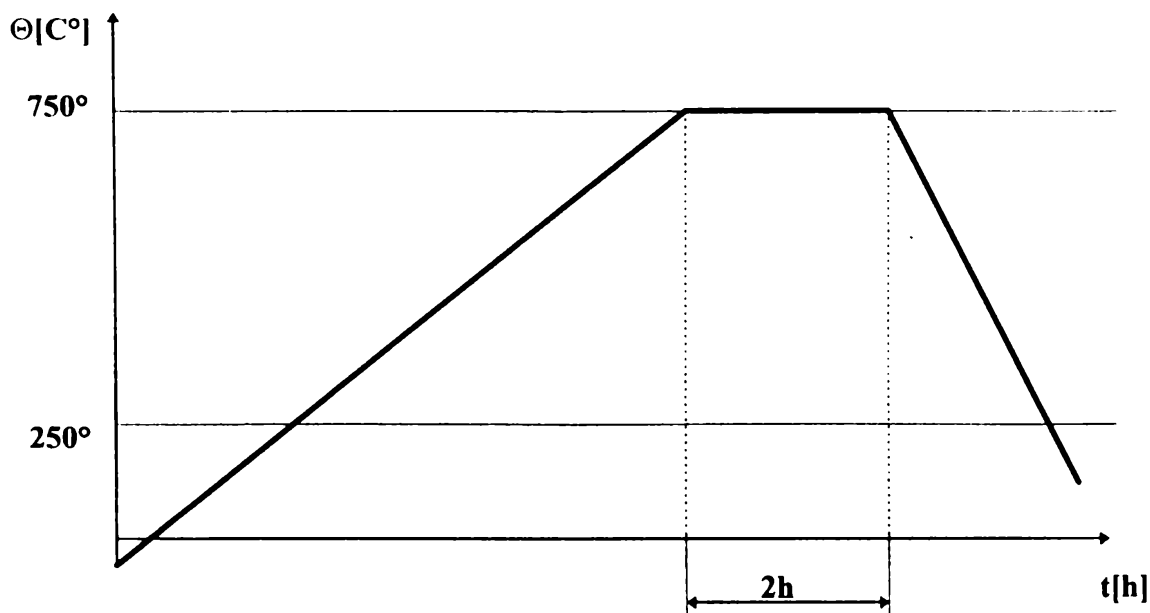


Fig. 5.16

În concluzie, discurile diamantate se utilizează pentru debitarea semifabricatului în felii, a feliiilor în fâșii dreptunghiulare, iar în final feliile dreptunghiulare sunt debitate în pătrate conform figurii 5.13. Orientarea axei cristalografice este cunoscută în permanență.

Următoarea operație tehnologică este rectificarea din pătrat în rotund. În acest scop, semifabricatele în formă de pătrate se orientează manual pe plăci de sticlă sub formă de șiruri de lungimi bine determinate figura 5.17.

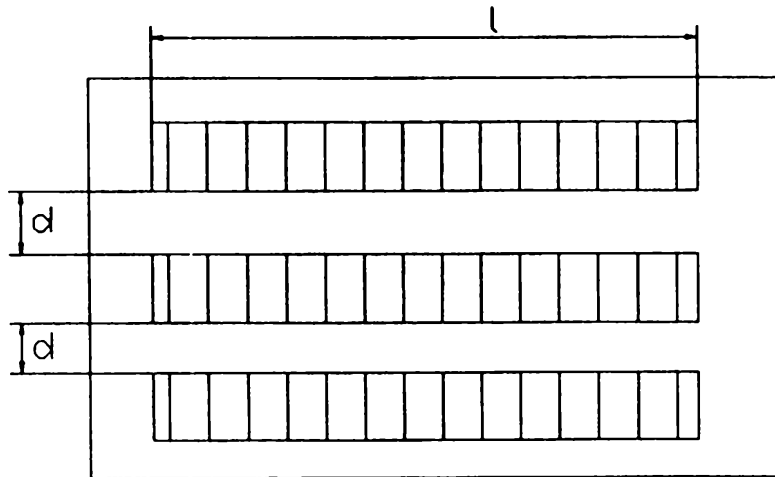


Fig. 5.17

Ca să aibe aderență între ele, semifabricatele de formă pătrată sunt unse cu ulei. Distanța dintre rânduri, d , este determinată de grosimea pensetei cu care se transportă semifabricatele pătrate pe cuțitul de reazem al mașinii de rectificat rotund grosier.

Lungimea l, este impusă de lungimea cuțitului de reazem 4, pe care se așază coloana de semifabricate pătrate, respectiv de lungimea generatoarei discului de rectificat 1, figura 5.18. Discul de rectificat 1 este din carbura de siliciu și realizează mișcarea de aschiere I.

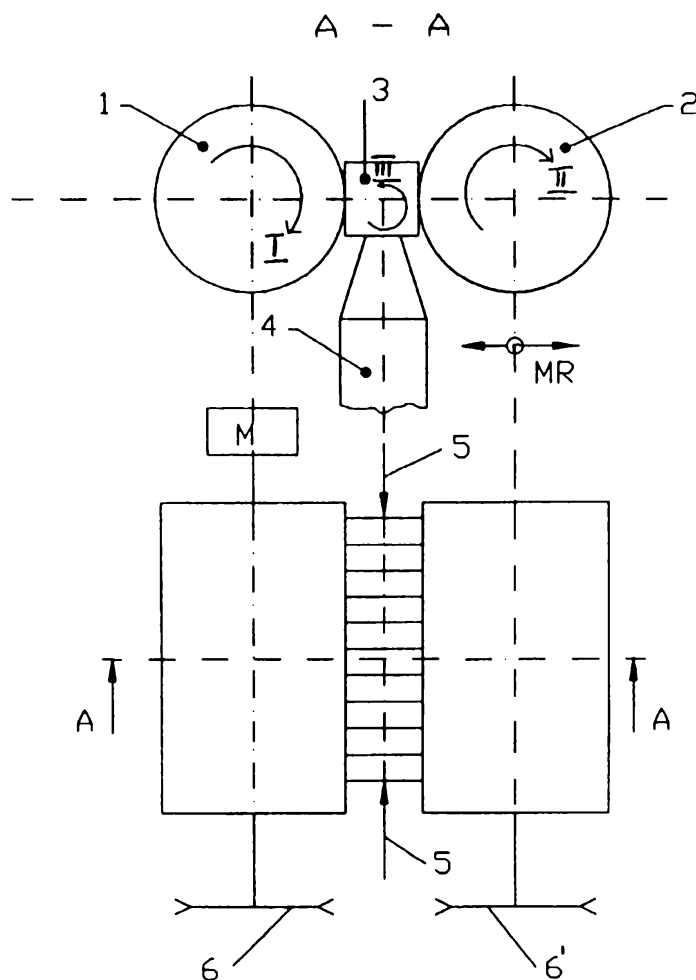


Fig. 5.18

Discul conducător 2 este din cauciuc dur și realizează mișcarea de rotație II, necesară antrenării semifabricatelor în formă de pătrate în mișcarea de rotație.

Cuțitul de reazem 4, este o lamă din tablă de arc de grosime 3mm. El este fixat de extremități în doi suporturi prinși pe masa mașinii. În acești doi suporturi sunt fixate și vârfurile 5, cu care se prinde axial coloana de semifabricate. Vârfurile 5, limitează axial mișcarea semifabricatelor și sunt confecționate din sârma ascuțită manual pe lamele de carbură de siliciu. Cuțitul 4, pe care se așază coloana de semifabricate este din tablă de arc pentru a avea o anumită elasticitate care să permită rotirea semifabricatului care inițial are formă patrată. De asemenea, discul conducător este din cauciuc ca să permită rotirea semifabricatului pătratic.

Cuțitul de reazem 4 se deteriorează în timp, datorită muchiilor pătratice a semifabricatelor și de aceea se ascute periodic manual pe plăcuțe de carbură de siliciu.

Pentru antrenarea în mișcarea de rotație a discului conducător se utilizează o transmisie cu curele, 6 și 6', fiind roți de curea.

Pe timpul prelucrării se folosește apa ca agent de răcire, iar discul conducător poate efectua mișcarea de reglare MR, manual de la un mecanism șurub - piuliță - pentru a asigura forța de avans radial necesară așchierii, pe măsură ce colțurile patratelor se rotunjesc.

Pentru a asigura precizia dimensională, precizia formei geometrice și calitatea suprafeței, după rectificarea din patrat în rotund, semifabricatele se vor rectifica exterior pe o mașină de finisat rotund, similară cu cea din figura 5.18, cu următoarele deosebiri: discul de rectificat 1 este din cupru cu diamant artificial imprimat prin presare, iar semifabricatul are formă rotundă în loc de patrată.

Datorită diferenței de granulație dintre discul din carbură de siliciu și cel din cupru cu diamant artificial, se realizează încadrarea în câmpul de toleranță conform pretențiilor tehnologice a semifabricatelor rectificate fin și îmbunătățirea calității suprafeței prelucrate.

La mașina de finisat rotund exterior cuțitul de reazem 4 nu este din tablă de oțel arc, și este o lamelă în formă de V din safir.

În vederea imprimării la rece a diamantului pe discul de cupru, acesta se așează pe un suport între două discuri din oțel dur. Unul dintre discurile de oțel dur este antrenat în mișcarea de rotație de către un motor electric, iar celălalt disc din oțel dur poate efectua o mișcare de reglare manuală. Periodic se unge discul de cupru cu diamant în suspensie. Se utilizează cupru deși este un material deficitar deoarece diamantul nu rezistă la compresiune decât la forță de cca 2,4 MPa, iar cuprul este un material moale.

5.2 Prelucrarea cavităților lagărelor din safir sau rubin

5.2.1 Prelucrarea cavităților sferice

Această operație se realizează în două faze de prelucrare: degroșare și finisare.[99]

În faza de degroșare dornul diamantat 1, este fixat pe axul superior al mașinii și este înclinat față de axa semifabricatului 2 cu $\alpha=25 \div 30^\circ$ și se reglează la adâncimea de pătrundere h , figura 5.19.

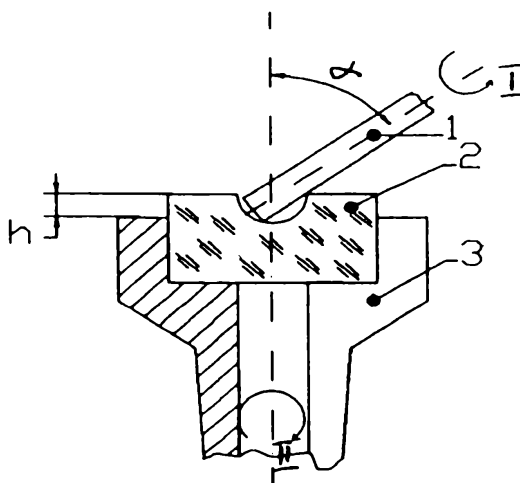


Fig. 5.19

Dornul diamantat este montat într-o tijă specială cu șerlac. Pentru centrarea dornului față de tijă se utilizează un dispozitiv simplu în care se prinde tija cu dornul în poziție orizontală. Șerlacul este încă cald, iar tija se rotește. Un șablon de lemn este adus

manual în dreptul dornului, care perforează o gaură. Prin prelucrarea acestei găuri și prin faptul că șerlacul este moale dornul își găsește o poziție centrală.

La mașinile utilizate pentru prelucrarea cavității sferice prinderea și desprinderea pieselor din bușele elastice 3 se face automat.

Suportul care poartă tija și dornul este prevăzut cu un braț lateral care apasă palpatorul unui comparator. În momentul în care s-a atins adâncimea de pătrundere h reglată, un circuit electric întrerupe brusc mișcarea suportului dornului. Operațiunea durează 30 secunde.

Semifabricatul care este fixat prin strângere în bușca elastică 3 se rotește cu o turație mai mică decât dornul diamantat.

$$n_I = 17.000 - 21.000 \text{ rot/min}$$

$$n_{II} = 5.000 - 6.000 \text{ rot/min}$$

Datorită turației mari este necesară o răcire permanentă cu ulei.

Pentru faza de finisare a cavității sferice se utilizează aceleași mașini cu deosebirea că dornurile diamantate au granulația mult mai fină. Operațiunea de finisare durează mai mult. Mașina este prevăzută cu un releu de timp, care întrerupe mișcarea suportului după un anumit interval de timp.

Și în acest caz, se păstrează comparatorul care evidențiază adâncimea de pătrundere a dornului, dar rotirea suportului în care este montată tija cu dornul este întreruptă de releul de timp.

După faza de degroșare și după faza de finisare semifabricatul se spală cu amilacetat se uscă pe masuța încălzită și se studiază cu microscopul stereoscopic.

5.2.2 Prelucrarea cavităților conice

Pentru prelucrarea cavităților conice sunt necesare trei faze de prelucrare: găurire, finisare și rodare.

Pentru găurire se utilizează mașini speciale semiautomate care utilizează drept scule așchietoare burghie cu vârf de diamant natural ascuțit după 4 muchii. Fațetarea diamantului natural se face la I.M.F. București. Vârful diamantului natural are forma piramidală patrulateră cu unghiul între muchii de 130° . Fixarea cristalului de diamant în suportul sculei se face prin lipire, conform figurii 5.20. [14]

Diamantul 1 se introduce într-un locaș executat în suportul sculei 3 împreună cu materialul de lipit 2, amestecat cu un flux pentru dezoxidare. Se încălzește local suportul sculei până la temperatura de topire a materialului de lipit, după care se răcește încet.

Montarea monocristalului de diamant în suport se realizează astfel încât fețele cristalului să nu fie paralele cu direcția forțelor care acționează asupra sa în timpul lucrului. Cristalul este bine fixat, când lipirea se face pe o lungime de cca 3 - 4 ori mai mare decât vârful rămas în afara suportului.

Burghiul 1, execută mișcarea de rotație I și mișcarea de avans III, iar semifabricatul 2 execută mișcarea de rotație II, fiind fixat în bușca elastică 3, conform figurii 5.21. Piesa se pune în bușcă manual cu penseta.

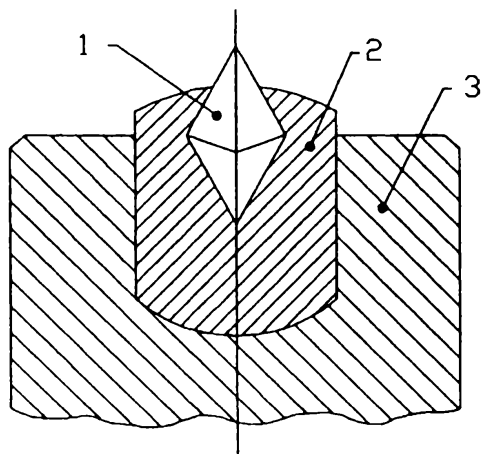


Fig. 5.20

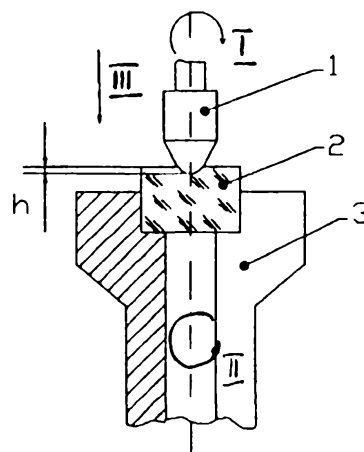


Fig. 5.21

Deoarece în prima etapă de profilare a cavității conice pe adâcimea h se obține o suprafață tronconică, este necesar să se realizeze într-o fază de finizare, rotunjirea vârfului cavității la o rază de racordare, corelată cu vârful conului dornului de prelucrare și unghiul de înclinare al acestui dorn.

La faza de finizare se utilizează dornuri cu micropulbere de diamant și cu diametrul transversal în corelație cu dimensiunile cavității lagărului. Unghiul de înclinare al dornului, α , este de $8^\circ - 11^\circ$, figura 5.22.

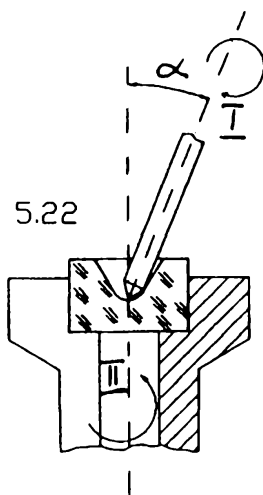


Fig. 5.22

Menținerea formei conului exterior al capătului activ al dornului diamantat, se realizează periodic manual prin lustruire cu plăcuțe abrazive din carbură de siliciu.

Mașinile pe care se realizează finisarea cavităților conice sunt de același tip cu cele care se utilizează la formarea și finisarea cavităților sferice, singura deosebire constând în faptul că alimentarea cu semifabricat nu este automată ci manuală, pentru a se putea controla periodic forma cavității conice la microscop.

După finisare, cavitățile conice sunt supuse operației de rodare pentru a asigura precizia formei geometrice a cavității și calitatea suprafeței impuse lagărelor conice. Schema de principiu a rodării este reprezentată în figura 5.23.

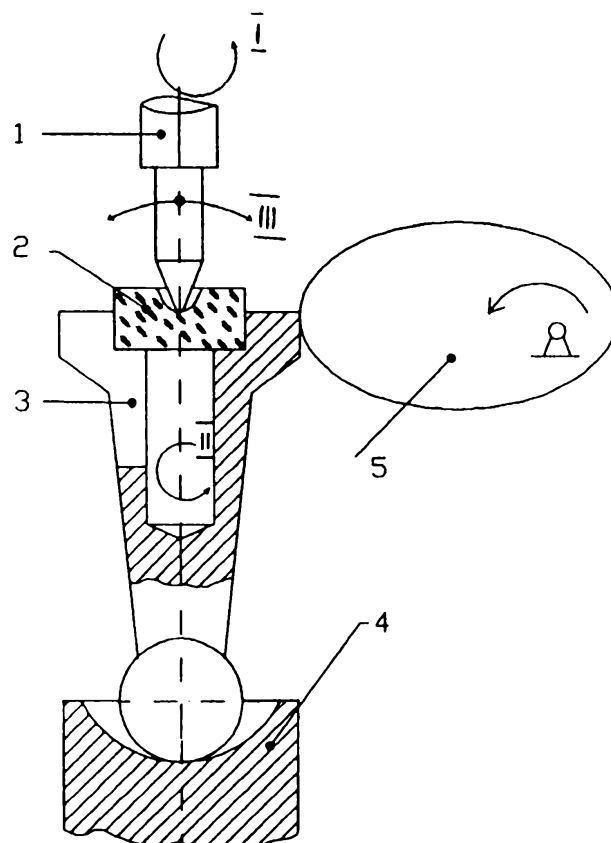


Fig. 5.23

Pentru rodare se folosește un amestec de micropulbere de diamant și vaselină medicinală care se interpune între dornul de oțel care realizează mișcarea I, ($n = 15.000 \div 22.000 \text{ rot/min}$) și cavitatea lagărului conic care se rotește cu mișcarea $n = 2.500 \div 4.100 \text{ rot/min}$.

Pentru finisarea corectă și completă a cavității, dornul mai realizează și mișcarea oscilantă III cu centrul de rotație în centrul razei de virf a dornului. La rodare, axul superior și inferior trebuie să se rotească într-o singură direcție.

După cum se observă din figura 5.23 bușa elastică 3 are o extremitate sferică. Pe masa mașinii este fixată piesa 4, care are prelucrată în ea o cavitate sferică. Oscilația laterală a sistemului se obține datorită camei 5.

Condiția esențială a realizării unei rodări corecte este ca raza la vârful dornului de oțel să fie corelată cu raza cavității conice și să fie lustruită oglinda. Controlul razei dornului se face cu proiectorul la scara 50:1, iar calitatea suprafeței se observă la microscopul stereoscopic binocular. Un dorn de oțel se utilizează pentru rodare un timp îndelungat. La un control precis, dacă apar abateri de la forma exterioară a semifabricatului de prelucrat dornul se înlocuiește imediat.

În final atât cavitatea sferică cât și cavitatea conică se lustruiesc. Semifabricatele cu cavitatea prelucrată se lipesc cu șerlac pe o placă de sticlă circulară care este perforată la mijloc. Discurile de sticlă cu semifabricatele lipite pe ele se montează pe un platou central, prin intermediul unui surub central care trece prin partea străpunsă a discului de sticlă. Prin intermediul unui sistem de roți dințate se imprimă platoului central o mișcare de rotație principală, iar discurile de sticlă se rotesc și ele, figura 5.24.

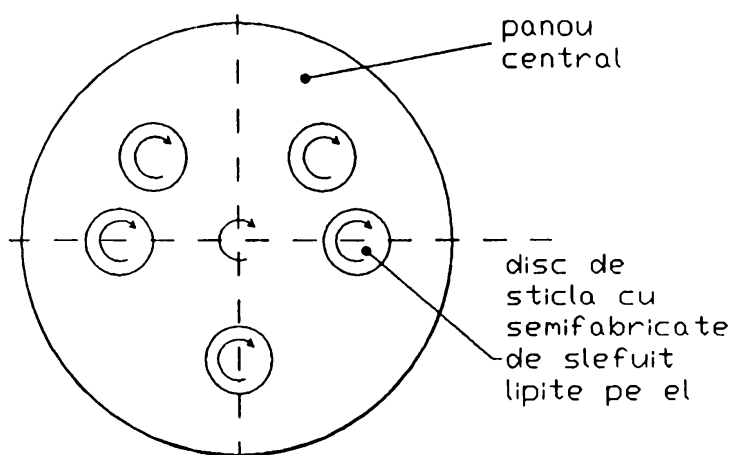


Fig. 5.24

Pentru lustruire se utilizează o mașină de lustruit cu perii multiple. Periile se află fixate pe un capac care se închide peste platoul central. Periile sunt circulare și au posibilitatea să se rotească, ele fiind antrenate de mișcarea discului central. Lustruirea se face cu pulbere de agat. După un interval de timp de 4 ore se schimbă sensul de rotație al platoului central. După un interval de timp de 8 ore se închide robinetul conductei și se oprește mașina. Se taie uniform parul periei, se reglează uniform presiunea de contact a periei, după care se continuă lustruirea. La sfârșit se scot plăcile de sticlă și se încălzesc. Lagărele se spală cu amilacetat și se usucă.

5.2.3. Prelucrarea cavităților străpunse

Procesul tehnologic de formare a cavităților străpunse prevede parcurgerea următoarelor operații:

- străpungerea orificiilor
- lărgirea orificiilor
- alezarea orificiilor
- rectificarea rotundă exterioară în raport cu alezajul a lagărelor străpunse.

Străpungerea orificiilor se realizează cu ajutorul fascicolului laser pentru fiecare lagăr în parte. Laserii utilizați în acest scop sunt aproape exclusiv laseri monomod TEM₀₀, funcționând în regim de impulsuri cu relaxare cu lungimea de undă $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ (mediu activ: sticlă sau granat de Y și Al, dopate cu Nd), energia impulsului este $E_i = 0,1 \div 20 \text{ J}$ și durata impulsului este $t_i = 0,25 \div 3 \text{ ms}$.

Străpungerea lagărului se realizează cu 3 - 4 impulsuri, în funcție de grosimea piesei care se perforează.

Impulsurile sunt declanșate de o camă care închide un contact electric și amorsează laserul figura 5.25.

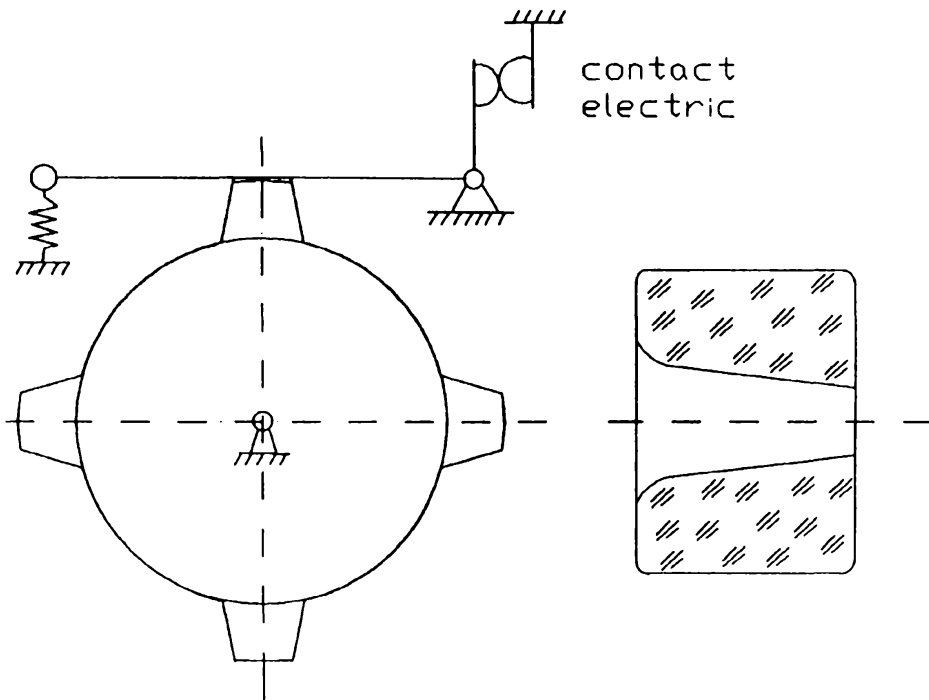


Fig. 5.25

Fig. 5.26

În cazul perforării realizabilă în regim mono sau multipuls, se obțin alezaje de secțiune circulară, cu suprafețele laterale conice și rugoase, figura 5.26. Fața care are contact cu fasciculul laser are orificiul rotunjit și mai mare, iar fața opusă are orificiul mult mai mic. Privind la microscop un orificiu realizat cu fasciculul laser în lagărul de rubin sau safir, se observă că safirul din vecinătatea găurii este afectat termic pentru că este înnegrit.

După găurirea lagărului de safir sau rubin cu laser, urmează operațiunea tehnologică de lărgire. Lărgirea orificiilor se realizează pentru a îndepărta zona afectată termic din jurul orificiului perforat, cu scopul de a obține diametrul prescris pentru lagărul final.

Lărgirea se realizează pe mașini speciale, figura 5.27, folosind sârme conice de cupru și micropulbere de diamant în suspensie de ulei.

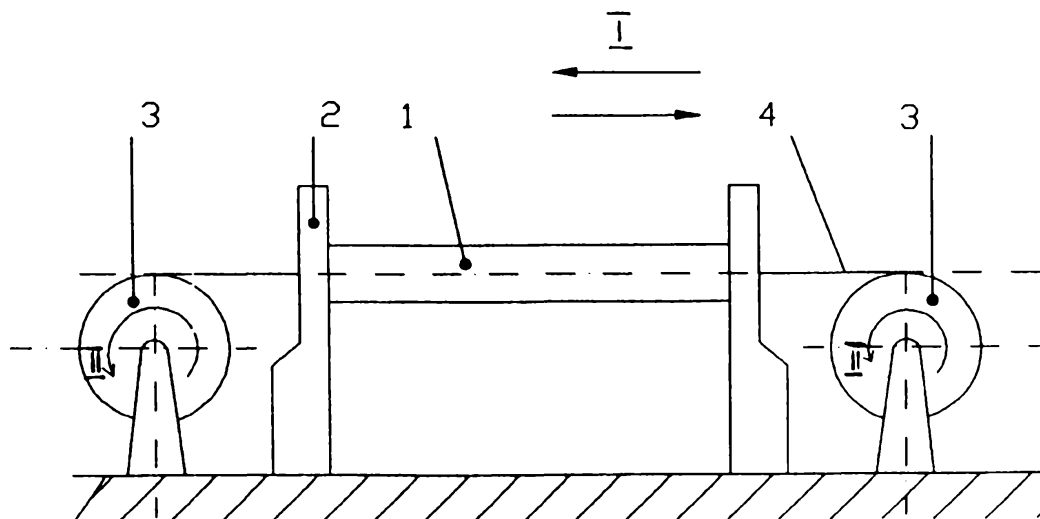


Fig. 5.27

Sârma de cupru cu o conicitate constantă și mică pe o lungime mare, se obține prin tragere prin filieră și înfășurare pe un dorn conic, ceea ce face ca viteza de tragere să se modifice constant influențând mărimea diametrului sârmei. O altă modalitate de obținere a sârmei conice de cupru, este corodarea chimică. Sârma de cupru este introdusă progresiv și cu viteză constantă cu unul dintre capete într-o baie corozivă de clorură ferică, iar scoaterea din baie se face începând cu capătul care a fost introdus ultimul și care va fi cel mai puțin corodat. Prin reglarea vitezei de introducere, timpul de menținere și a vitezei de scoatere din baia corozivă, se poate stăpâni dimensiunea sârmei.

Piesele străpunse pe instalații laser, se înșiră ca mărgelile pe sârma conică 4 și sunt introduse în amestecul de rigidizare turnat în jgeabul 1. Prin solidificare, amestecul de rigidizare format din plumb, staniu și bismut imobilizează piesele, care se vor comporta în timpul lărgirii ca o singură piesă de lungime egală cu lungimea suportului. Din loc în loc înainte de turnarea amestecului de rigidizare se montează niște bușe de alamă cu locaș pentru introducerea de ulei de ricin cu pulbere de diamant în suspensie. Sârma conică se tensionează pe tamburii 3 și realizează mișcarea I rectilinie alternativă de dute-vino în plan orizontal, în timp ce și avansează prin mișcarea curbilinie intermitentă II.

Procesul de așchiere se desfășoară comparativ ca la broșare, doar că în acest caz, sârma conică are rolul de a transporta granulele de diamant și datorită efectului de împănare între sârmă și pereții alezajului supuși lărgirii se așchiază particule din piese. Când partea conică a sârmei s-a terminat, urmează o porțiune de diametru constant care are rolul de calibrare a alezajelor pieselor prelucrate, în limitele dimensiunilor nominale prescrise.

Alezarea orificiilor de dimensiuni peste 1,5 mm se realizează pe o instalație a cărei schemă de principiu este reprezentată în figura 5.28.

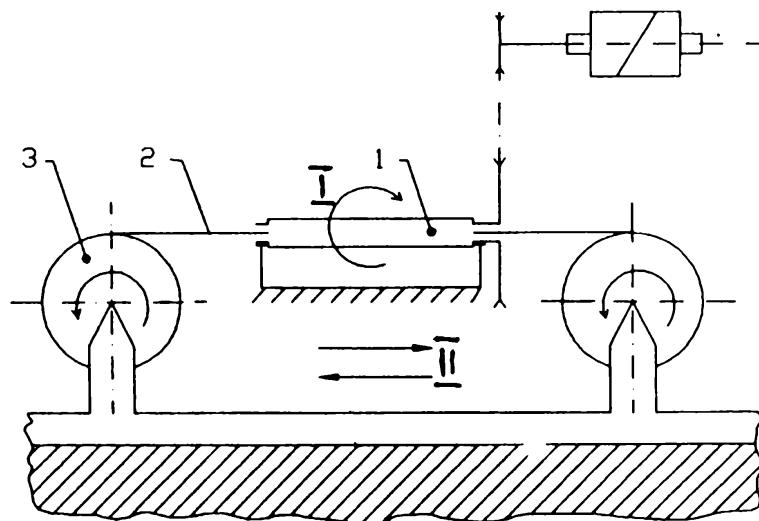


Fig. 5.28

În acest caz se utilizează un fascicol de sârme ondulate. Suportul 1, împreună cu piesele realizează mișcarea I, iar fascicolul de sârme ondulate din alamă 2, împreună cu suportul rolor 3 realizează o mișcare rectilinie alternativă II, pentru ca în final alezajele obținute să aibă formă circulară și precizia dimensională, respectiv calitatea suprafeței cerute.

Așchiera are loc datorită prezenței amestecului de diamant artificial și vaselină medicinală.

Numărul de sârme ondulate din fascicol și diametrul acestora se stabilește prin

calcul în funcție de dimensiunile alezajelor prelucrate.

Rectificarea rotundă exterioară în raport cu alezajul a lagărelor străpunse este necesară pentru a asigura coaxialitatea între orificiu și exteriorul lagărului.

Principial schema de prelucrare este redată în figura 5.29.

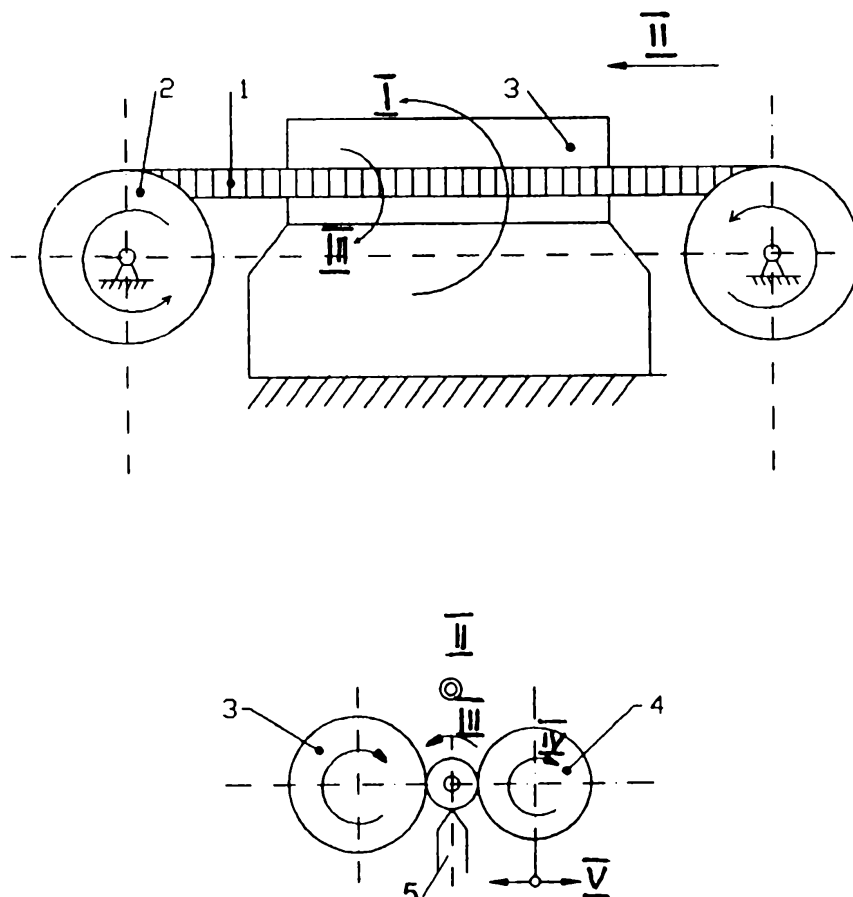


Fig. 5.29

Lagărele 1, alezate la cota nominală prevăzută, se înșiră pe o sârmă de cupru calibrată cu care se realizează un ajustaj alunecător. Sârma de cupru se înfășoară pe tamburii 2, care au rolul de a asigura mișcarea de avans II printre discurile mașinii de rectificat 3 (disc de cupru cu diamant imprimat prin presare) și 4 (disc conductor din cauciuc dur). Pe porțiunea de contact dintre piese și discuri, acestea se sprijină pe cușitul suport 5. Discul de rectificat 3 realizează mișcarea de rotație I, datorită căreia piesele se vor roti cu mișcarea III. Forța de apăsare necesară pentru îndepărtarea adaosului de prelucrare se asigură prin deplasarea discului 4 în mișcarea de avans radial V, cu un mecanism șurub piuliță.

În afară de utilizarea laserului pentru străpungerea lagărelor, laserul și ultrasunetele se pot aplica și la profilarea preliminară a cavităților lagărelor de safire și rubine.

Pentru prelucrarea cavităților conice sau sferice la lagărele de safire și rubine se poate utiliza și laserul în regim monopuls, de aceea, o posibilitate de îmbunătățire a procesului tehnologic de fabricare a lagărelor o poate constitui punerea la punct a prelucrării de degroșare cu fascicol laser sau ultrasunete.

În cazul ultrasunetelor productivitatea prelucrării cavităților conice sau sferice este mai ridicată, deoarece se pot prelucra un număr mare de lagăre simultan. Astfel, utilizând un obiect de transfer cu diametrul de 15 mm, pe suprafața frontală fiind lipite 35 tuburi cu diametrul interior 1,6 mm și lungimea 5 mm din oțel, s-au prelucrat simultan 35 de lagăre de safir sau rubin cu diametru de 1,6 mm și grosimea 2 mm, în timp de 8,5 minute utilizând carbură de bor. Decuparea și adâncirea conică a unui lagăr din safir a durat cca 1 minut.

În final toate lagărele indiferent de formă sau dimensiunile lor se degresează prin spălare cu amilacetat și se usucă pe măsuțe special încălzite. Spălarea cu amilacetat sau alcool etilic nu curăță în întregime suprafețele lagărelor. Curățirea ultrasonică asigură o îndepărtare completă a impurităților. Ultrasunetele nu provoacă defecte sau eroziuni pe suprafețele curățate. Fenomenul care stă la baza procesului de curățire ultrasonică este cavitația ultrasonică. [108]

Etapele succesive ale acestui fenomen sunt următoarele:

- într-o primă etapă, are loc formarea bulelor de cavitație datorită schimbărilor de presiune și ruperii lichidului în anumite locuri, atunci când presiunea acustică are valori negative și anulează presiunea forțelor de coeziune dintre particulele lichidului
- în etapa următoare, bulele de cavitație pătrund în porii stratului aderent, care trebuie îndepărtat sau în spațiile dintre acest strat și suprafața piesei figura 5.30.
- ulterior, are loc o dezvoltare a bulelor de cavitație, rezultând forțe mai mari decât cele de adeziune dintre stratul aderent și suprafața piesei, și se produce smulgerea succesivă de particule din acest strat figura, 5.31.

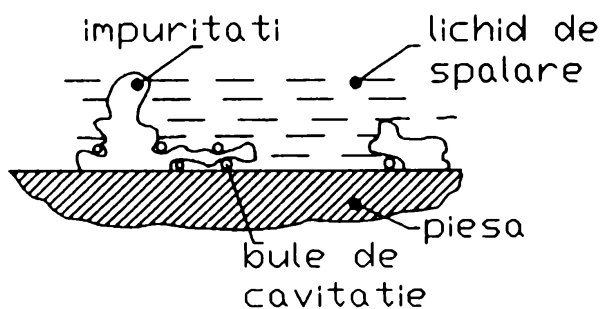


Fig. 5.30

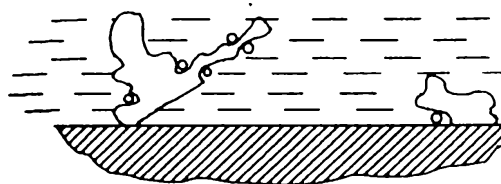


Fig. 5.31

Datorită faptului că ultrasunetele se propagă în toată masa lichidului de spălare, devine astfel posibilă curățirea în locurile cele mai greu accesibile, care sunt însă în contact cu lichidul de spălare. O eficacitate maximă a procesului de curățire ultrasonică se obține în condițiile încălzirii lichidului de spălare la temperatura de 50 - 55°C.

O instalație de spălare ultrasonică este prezentată în figura 5.32.

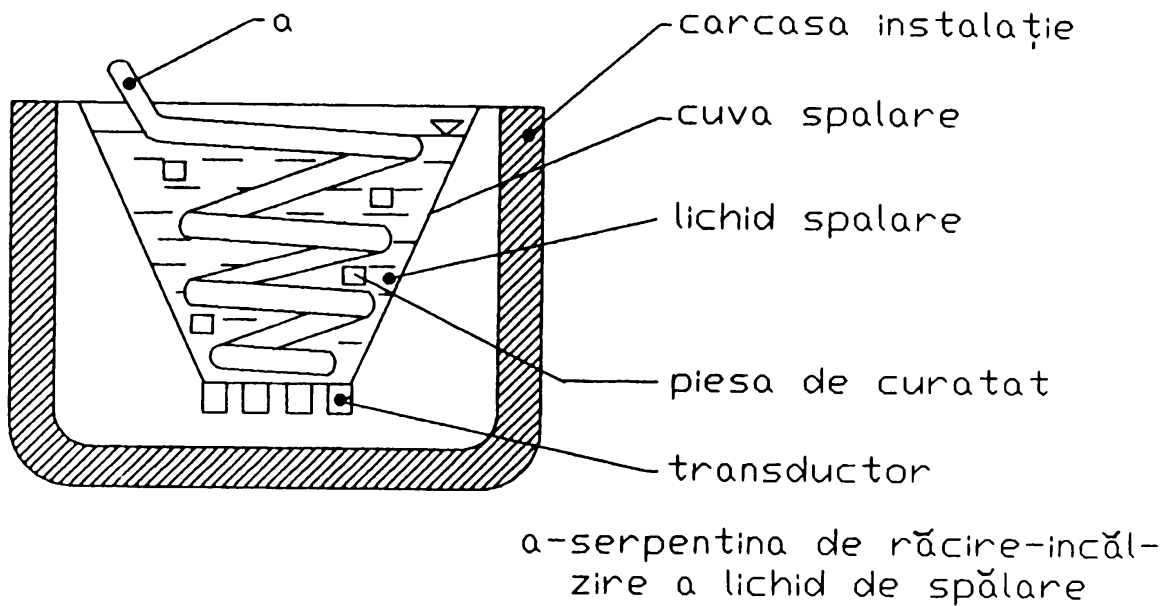


Fig. 5.32

În general, transductorii care sunt utilizați la aceste tipuri de instalații se montează în afara cuvei de spălare, vibrațiile ultrasonice fiind transmise lichidului de spălare prin intermediul peretelui inferior al cutiei.

Transductorii utilizați la aceste tipuri de instalații sunt, de regulă, de tip piezoceramici sau magnetostrictivi, frecvența de lucru fiind cuprinsă în gama 20-25 Khz, iar puterea generatorului ultrasonic este de cca 100 - 300 W.

Lichidele de spălare utilizate sunt soluții de apă moderat alcaline, temperatura de spălare fiind 24 - 65 °C, iar timpul de curățire este de 6 - 10 minute.

6. Modelarea teoretică a procesului de găurire cu laser, pentru un impuls

Teza de doctorat propune optimizarea prelucrării cu fascicul laser a alezajelor în lagărele de safire și rubine sintetice. În acest scop se analizează parametrii fascicolului laser în cazul prelucrării microalezajelor în lagărele de safir și rubin și în finalul studiului se stabilesc valorile parametrilor fascicolului laser astfel încât alezajul obținut să aibe forma și dimensiunile controlate și eficiența economică de prelucrare a alezajelor să fie ridicată [100].

Fasciculele laser sunt radiații electromagnetice monocrome și coerente din domeniul optic, caracterizate prin direcționalitate și strălucire excepționale [63].

Dispozitivele capabile să genereze fascicule laser (numite, în mod curent, oscilatori laser) funcționează pe principiul emisiei stimulate de radiație. Un oscilator laser este constituit, în esență:

1) dintr-un mediu activ, amplificator de radiație optică, în care se produce printr-un mecanism de excitare adecvat o inversiune critică de populație în raport cu starea de echilibru termodinamic (populația reprezintă numărul de atomi sau molecule din unitatea de volum, care se găsesc pe nivelele energetice caracteristice mediului activ) și,

2) dintr-un rezonator optic, care furnizează reacția pozitivă pentru dezvoltarea unei oscilații de emisie spontană din domeniul spectral comun mediului activ și rezonatorului, în modul particular al rezonatorului. De obicei, rezonatorii utilizați în oscilatorii laser sunt deschiși (nu folosesc suprafețe laterale) și constau din două oglinzi de capăt (plane, sferice), plasate perpendicular pe axa longitudinală a mediului activ. Una din oglinzi este total reflectatoare, iar cealaltă parțial reflectatoare permițând cuplarea radiației din rezonator în exterior. Dimensiunile rezonatorului sunt mult mai mari decât lungimea de undă a radiației laser emise.

Energia radiată este concentrată într-un fascicul de secțiune mică și divergența unghiulară coborâtă.

Oscilatorii laser sunt de două tipuri: cu mediu activ gazos sau cu mediu activ solid.

În general, pentru prelucrarea alezajelor se pot utiliza atât oscilatori laser cu mediu activ gazos cât și oscilatori laser cu mediu activ solid. Studiind un alezaj produs de un laser cu mediu activ gazos într-un lagăr de corindon și apoi un alezaj produs de un laser cu mediu activ solid, se observă că în cazul utilizării laserului cu mediu activ gazos pereții alezajului sunt mult mai înclinați în comparație cu pereții alezajului produs de laserul cu mediu activ solid, pentru că divergența unghiulară a fasciculului laser produs de un oscilator laser cu mediu activ solid este mult mai mică în comparație cu divergența unghiulară a fasciculului laser provenit de la un oscilator laser cu mediu activ gazos. De asemenea fasciculul laser provenit de la un laser cu mediu activ solid se poate focaliza astfel încât dimensiunile petei focale sunt mult mai mici comparativ cu fasciculul laser provenit de la un laser cu mediu activ gazos.

Din cauza acestor calități, la prelucrarea alezajelor în lagărele de safir și rubin sintetic se folosește laserul cu mediul activ solid.

Din multitudinea de medii active solide care pot fi excitate, numai câteva sunt în practică utilizate, datorită faptului că un mediu activ-laser trebuie să aibe o eficiență ridicată, o divergență mică a fasciculului emis și o bună stabilitate a emisiei în timp. Datorită acestor cerințe numai trei tipuri de laseri cu mediul activ solid s-au dezvoltat și perfecționat: laser cu rubin, laser cu sticlă dopată cu Nd și laser cu granat de itriu și aluminiu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopat cu Nd, simbolizat YAG.

Laserul cu rubin a fost primul generator laser realizat în 1960. Pompajul se face cu lămpi flash cu xenon. Întrucât lampa flash degajă o cantitate mare de căldură, se impune o limitare a frecvenței de repetiție a impulsurilor laser, rata fiind de câteva impulsuri pe minut, în cazul utilizării sistemului de răcire cu apă și de un impuls la

câteva minute când răcirea laserului se face cu aer. Din acest motiv laserul cu rubin are un randament foarte scăzut.

Laserii YAG au o putere mai mare decât laserii cu sticlă dopată cu ioni de neodim, dar sunt foarte costisitori. Din aceste motive la prelucrarea alezajelor în lagărele de safir și rubin cel mai convenabil este laserul cu sticlă dopată cu Nd.

Deoarece, pentru a se prelucra un alezaj într-un material dur cum este safirul sau rubinul, este nevoie de un fascicul laser de putere mare se utilizează laser care funcționează în regim de impulsuri.

Dacă s-ar utiliza la prelucrarea microalezajelor un oscilator laser care funcționează în regim de undă continuă, datorită puterii mari a fascicului laser, materialul ceramic sau cristalin în care se prelucrează alezajul se distruge prin spargere.

În cazul prelucrării alezajelor în lagărele din safir sau rubin sintetic cu ajutorul laserului cu sticlă dopată cu Nd, care funcționează în regim de impulsuri, în jurul orificiului prelucrat apar deseori microfisuri. Aceste microfisuri apar datorită temperaturii extrem de înalte la care este supusă zona în care se prelucrează orificiul, în timpul procesului de prelucrare cu laser.

Gradienții mari de temperatură din zona prelucrată cu fascicul laser pot fi micșorați dacă se încălzesc la temperaturi înalte lagărele de safire și rubine, înaintea procesului de găurire cu laser [21], [87].

Pentru a se studia parametrii fascicului laser cu scopul de a se optimiza prelucrarea microalezajelor în semifabricatele de safir sau rubin sintetic, s-a realizat la I.A.E.M. Timișoara un experiment utilizând 840 de lagăre de alunecare plane, pentru mecanica fină.

Experimentul pornește de la o idee mai veche a prof.dr.ing. A. Nichici și a prof.dr.ing. V. Popovici [64] și a fost executat cu contribuția de un înalt profesionalism a tehnicianului V. Horvath, folosindu-se laserul existent la I.A.E.M. Timișoara, secția de safire și rubine.

Instalația laser de la I.A.E.M. Timișoara, cu care s-a realizat experimentul este prezentată în fig. 6.1 și este de proveniență chinezească.

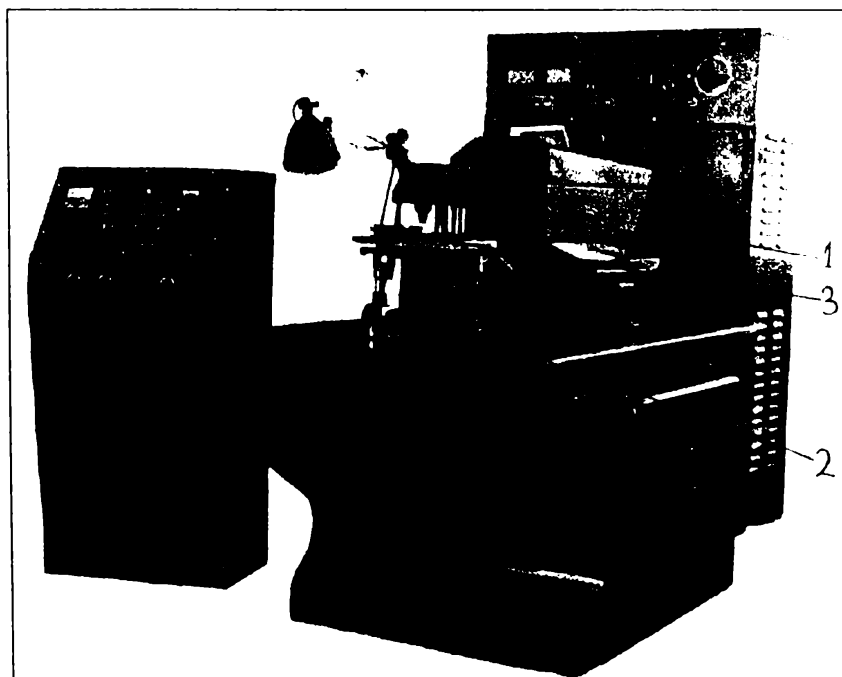


Fig. 6.1

În figura 6.1, oscilatorul laser este poziția 1. Este un oscilator laser cu mediul activ solid, sticla dopată cu Nd, bara de sticlă are dimensiunile $\phi 8 \times 22$ mm. Energia impulsurilor poate fi reglată în limitele 0,5-20 J, iar frecvența maximă de repetiție a impulsurilor este de 80 imp/s.

Durata impulsurilor este de ordinul 0,25...1,2 ms. Lungimea de undă a radiației laser este de $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Structura modală a fascicului laser emis de tip monomod, TEM_{00} .

La ora actuală, în lume există instalații laser extrem de performante, cum este de exemplu instalația laser de construcție americană [109], prezentate în fig. 6.2.

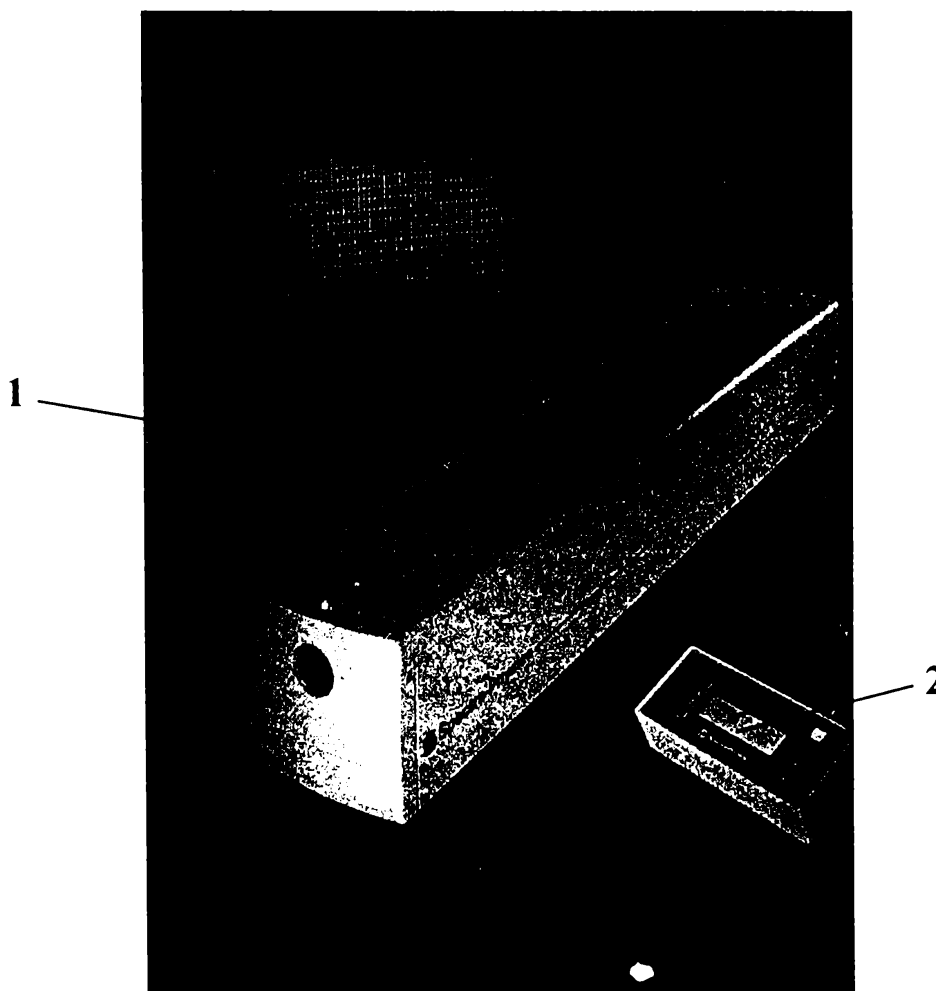


Fig. 6.2

În figura 6.2, oscilatorul laser este poziția 1. Este de asemenea un oscilator laser cu mediu activ solid, sticlă dopată cu Nd, care generează o radiație laser cu lungimea de undă $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, aceeași ca și la oscilatorul laser utilizat la I.A.E.M. Timișoara.

Dimensiunile acestui oscilator sunt mult mai mici în comparație cu dimensiunile oscilatorului laser utilizat la I.A.E.M. Timișoara, iar calitățile lui sunt excepționale. Acest tip de laser are o stabilitate deosebită, este garantat 12 luni, este controlat prin

computer și este comandat cu ajutorul telecomenzii 2. După programarea inițială a computerului, nu mai este necesară nici o comandă de recorectare a programului.

Schema de principiu a oscilatorului laser de la I.A.E.M. este prezentată în fig. 6.3.

Mediul activ 1, este o bară de sticlă dopată cu Nd, $\phi 8 \times 22$ mm. Rezonatorii utilizați sunt deschiși și constau din două oglinzi de capăt, plane, plasate perpendicular pe axa longitudinală a mediului activ, permițând cuplarea radiației din rezonator în exterior. Oglinda 2' este total reflectatoare și oglinda 2 este parțial reflectatoare.

Pompajul se face cu un tub flash cu Xe, 3. Pentru ca iluminarea să fie și mai intensă carcasa 4 are pereții interiori reflectorizanți.

Energia radiată este concentrată într-un fascicul de secțiune mică prin intermediul unui sistem optic, notat SO1.

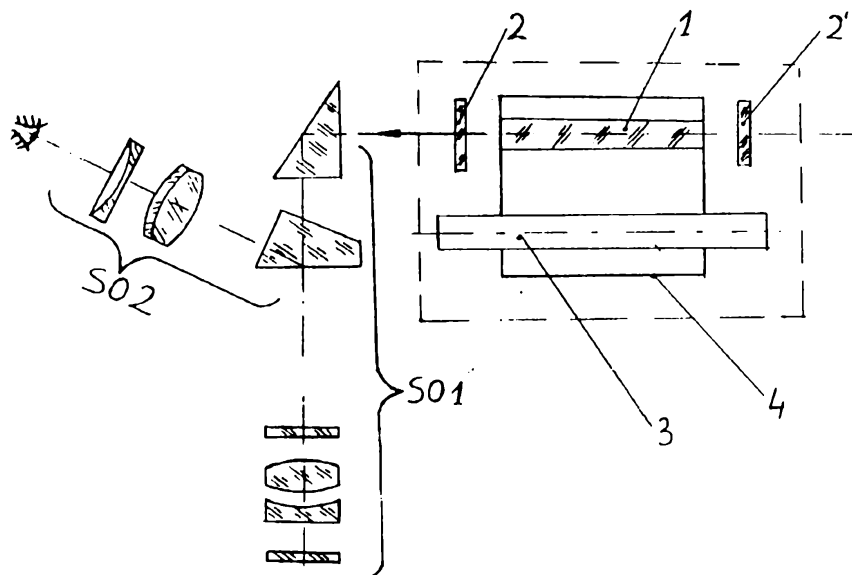


Fig. 6.3

Sistemul optic notat cu SO2 este utilizat la poziționarea fascicului laser în centrul suprafeței de prelucrat.

Revenind la fig. 6.1 se observă că instalația laser este prevăzută cu o masă de lucru staționară, în coordonate X-Y-Z, 2, și cu un dispozitiv de alimentare cu piese, 3. În fig. 6.4 este prezentată schema cinematică a dispozitivului de alimentare cu piese.

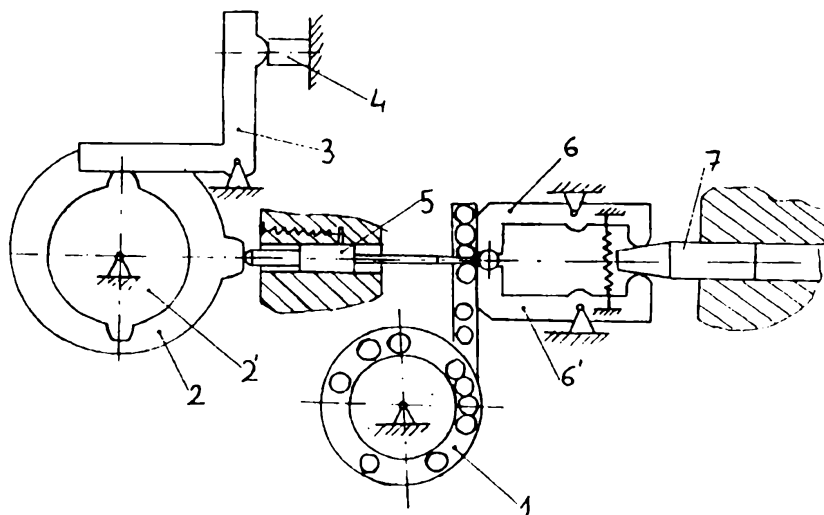


Fig. 6.4

Piese, respectiv lagărele, care se perforază cu laser, sunt depuse pe tamburul 1, care se rotește, împingând lagărele într-un jgheab. Ajungând în dreptul fascicului laser, lagărul este poziționat de brațele identice 6 și 6' și de vârful 5, a cărui mișcare este dirijată de cama 2.

Mișcarea camelor 2 și 2', precum și a tamburului 1, este produsă de un motor electric de la care se transmite mișcarea prin intermediul transmisiilor cu curele.

Laserul funcționează în impulsuri produse prin închiderea unui contact electric, datorită mișcării camei 2', care produce oscilația brațului 3.

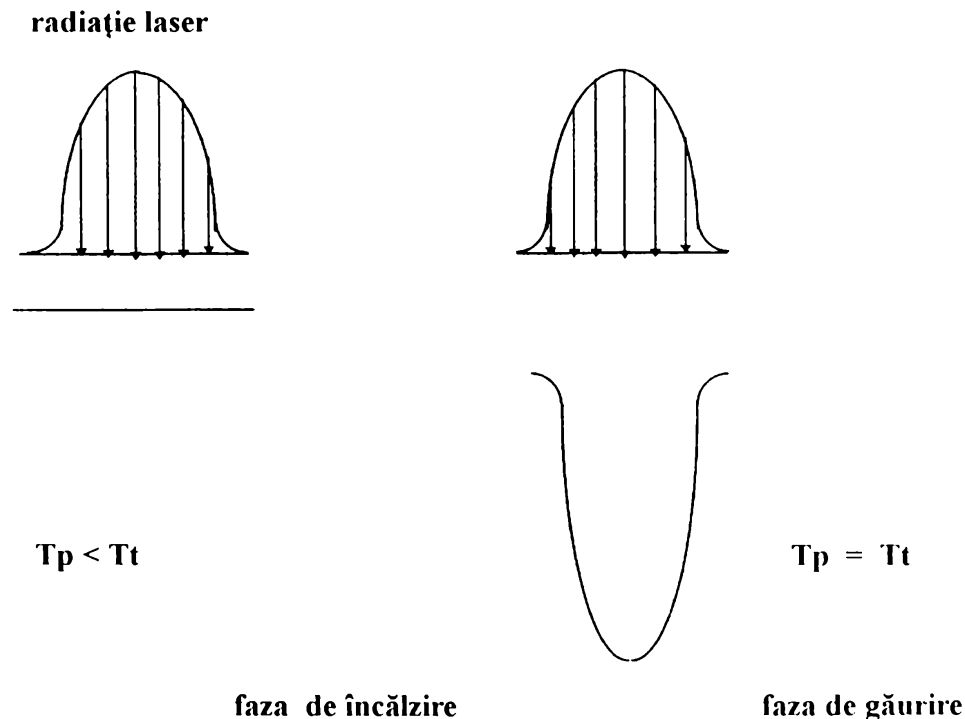
Spre deosebire de materialele opace, în particular metale, la care adâncimea de penetrare a radiației laser este limitată de efectul pelicular la valori de ordinul 5-10 nm, iar încălzirea prin conversia energiei radiației are un caracter de suprafață în cazul materialelor parțial transparente (inclusiv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

Prelucrarea microalezajelor cu fascicul laser poate fi împărțită în două etape:

- încălzirea
- găurirea propriu-zisă

În faza de încălzire, temperatura suprafeței de prelucrat crește până la o anumită valoare datorită interacțiunii cu fasciculul laser. Faza de încălzire este de foarte scurtă durată, pentru că intensitatea fascicului laser este foarte mare.

În timpul fazei de încălzire suprafața de prelucrat nu este erodată și nu se produce găurirea pentru că nu apare tranziția de fază. După ce temperatura suprafeței atinge punctul de topire care la rubine și safire este foarte ridicat $T_i=2050\text{ }^\circ\text{C}$, apare găurirea, figura 6.5.



T_p -temperatura suprafeței de prelucrat
 T_t - temperatura de topire

Fig. 6.5

În timpul procesului de găurire, temperatura dezvoltată în interiorul materialului de prelucrat este extrem de înaltă. Temperatura de vaporizare a safirului și rubinului este $T_v=3500\text{ }^\circ\text{C}$, dar uneori în timpul procesului de găurire se ating temperaturi și mai înalte.

Datorită acestei temperaturi înalte dezvoltate în timpul procesului de găurire și datorită presiunilor mari care apar la impactul cu radiația laser, materialul eliminat din microalezajul prelucrat cu laser este expulzat violent din cavitatea prelucrată. [85]

Distribuția temperaturii în interiorul piesei de prelucrat este reflectată de formula: [21]

$$T - T_0 = \frac{2I_0}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} - \frac{I_0 z}{k} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2(\alpha t)^{1/2}} \right) \quad (1)$$

unde α este difuzia termică

I_0 este intensitatea fascicolului

z este adâncimea microalezajului

Timul necesar ca suprafața de prelucrat să ajungă la temperatura T_s , care este temperatura tranziției de fază, poate fi determinat din ecuația (1), considerind $T=T_s$, la momentul $z = 0$. [21]

$$T_s - T_0 = \frac{2I_0}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Din formula (2) poate fi calculată durata fazei de încălzire:

$$t_h = \frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{k(T_s - T_0)}{2I_0} \right)^2 \quad (3)$$

În timpul fazei de încălzire nu se produce găurirea pentru că nu apare încă tranziția de fază datorită temperaturii care este inferioară temperaturii de topire. După ce temperatura suprafeței atinge punctul de topire, apar găurirea.

Pentru a calcula valoarea de prag a intensității fascicolului laser, I_0 , se consideră teoretic fascicolul laser ca având o distribuție uniformă a intensității, figura 6.6.

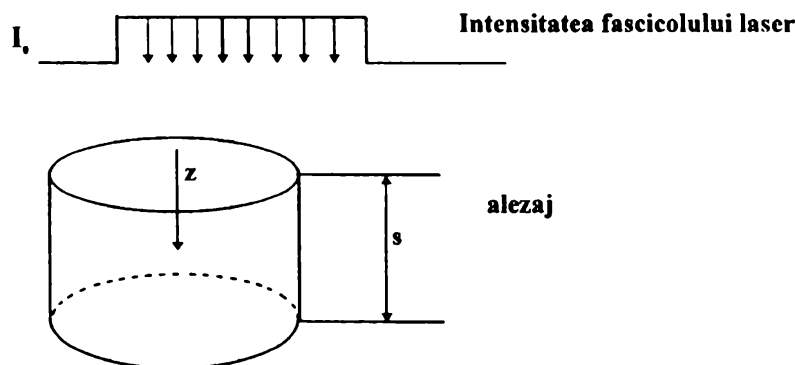


Fig. 6.6

Valoarea de prag a intensității fascicolului laser, I_0 , este acea valoare a intensității fascicolului focalizat capabilă să declanșeze eroziunea materialului supus prelucrării, I_0 se calculează cu formula (4).

$$I_0 = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (4), \text{ unde } P = \frac{E}{t}$$

Studiind formula (4) se observă că mărirea excesivă a intensității incidente I_0 a fascicului laser, determină creșterea puterii fascicului laser și deci și a dimensiunilor transversale ale microalezajului format [63].

Rezultă că pentru optimizarea energetică și geometrică a prelucrării microalezajelor se impune minimizarea lui I_0 și implicit a lui E (cu luarea în considerare a două restricții principale):

- asigurarea unei valori de prag I_0 a intensității radiației suficiente pentru aducerea în stare de absorbție ridicată a materialului supus iradierii;

- asigurarea unei valori de prag I_0 , care să satisfacă condiția: E absorbită de material este aproximativ egală cu E consumată pentru vaporizarea materialului, valoare a intensității care este capabilă să asigure o viteză de eroziune suficient de mare pentru ca acțiunea proceselor de conducție termică în zonele limitrofe materialului iradiat să fie neglijabilă.

Pentru a se stabili viteza de eroziune $\frac{\partial s}{\partial t}$, trebuie cunoscut gradientul de temperatură al frontului de eroziune. Distribuția temperaturii în solid este guvernată de următoarea ecuație a conductiei termice.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Ecuația conductiei termice poate fi simplificată:

$$-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right) \frac{dT}{dz} = \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (6)$$

Condițiile limită sunt:

$$\begin{aligned} T &= T_s && \text{la } z=0 \\ T &= T_0 && \text{la } z \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (7)$$

Aplicând condițiile de limită, ecuația (6) poate fi rezolvată pentru distribuția de temperatură în interiorul solidului sub forma:

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = e^{-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{ds}{dt} \right) z} \quad (8)$$

Gradientul de temperatură al frontului de găurire poate fi determinat ca:

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} = -\frac{1}{\alpha} \left(\frac{ds}{dt} \right) (T_s - T_0) \quad (9)$$

Echilibrul de încălzire al frontului de eroziune poate fi exprimat ca:

$$aI_0 = \rho L \frac{\partial s}{\partial t} - k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} \quad (10)$$

unde: a este absorbția materialului; ρ este densitatea; L este căldura latentă de topire; k este conductivitatea

Substituția gradientului de temperatură în balanța energetică duce la:

$$aI_0 = \rho L \left(\frac{ds}{dt} \right) + \rho c_p \left(\frac{ds}{dt} \right) (T_s - T_0) \quad (11)$$

Viteza de eroziune poate fi exprimată ca:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{aI_0}{\rho(L + c_p(T_s - T_0))} \quad (12)$$

Adâncimea cavității poate fi determinată integrând ecuația (12):

$$S = \frac{aI_0(t - t_h)}{\rho(L + c_p(T_s - T_0))} \quad (13)$$

pentru $t \leq t_h$, $s = 0$.

Pe baza relațiilor prezentate anterior, au fost concepute izotermele de topire și vaporizare, figura 6.7, în cazul particular al prelucrării unui alezaj cu un singur impuls laser [94], [95]. Energia impulsului laser este de 0.62 J la tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj de 1500 V și capacitatea sistemului de 1000 μF . Adâncimea alezajului astfel obținut este de 140 μm .

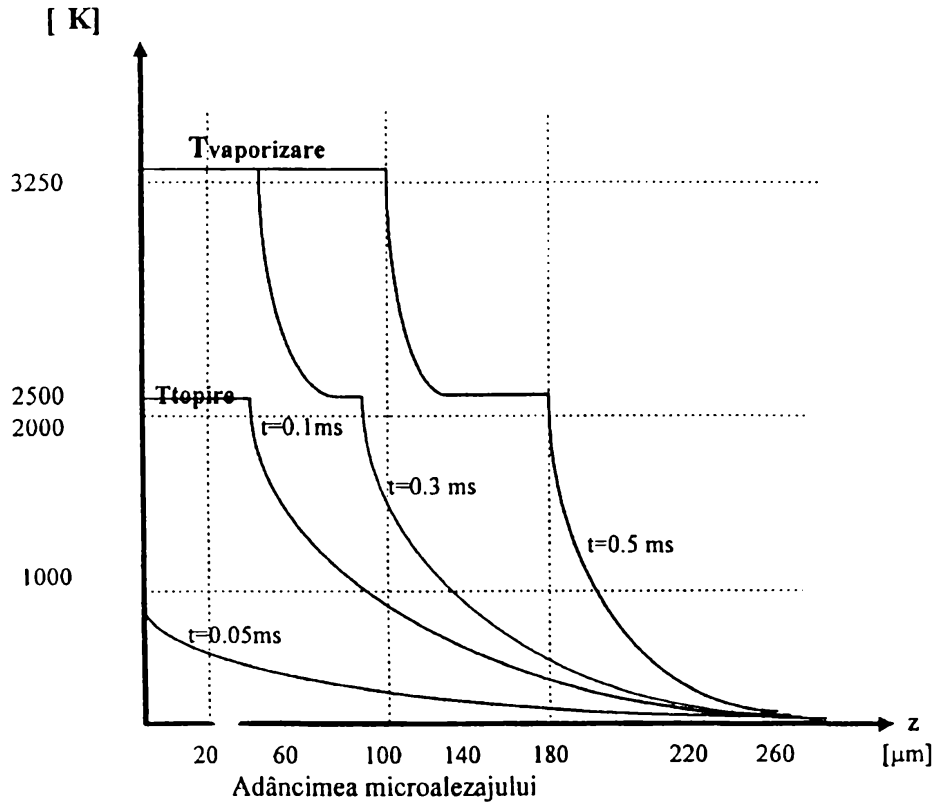


Fig. 6.7

Puterea unui impuls laser este P:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{0.62}{0.0005} = 1240W \quad (14)$$

Durata fazei de încălzire se calculează cu formula (3):

$$t_h = \frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{k(T_s - T_0)}{2J_0} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{k}{c_p \cdot \rho}$$

În urma calculului se obține, $t_h = 0,05$ ms.

α - coeficientul de difuzivitate termică

În ultima formulă, k , reprezintă conductivitatea termică: $k=0.075$ W/cmK

ρ - densitatea safirului artificial, $\rho=3.986$ g/cm³

c_p - căldura specifică, $c_p=0.7745$ J/gK

Cu aceste valori mărimea lui α este:

$$\alpha = \frac{0.075}{0.7745 \cdot 3.986} = 0.0243 \frac{cm^2}{s}$$

I_0 se calculează cu formula (4)

$$I_0 = \frac{4P}{\pi d^2}$$

$$I_0 = 246815 \frac{W}{cm^2}$$

d - diametrul fascicolului laser (în general $d=0.8$ mm)

Pentru a afla durata perforării microalezajului folosim formula (13):

$$t - t_h = \frac{s\pi\rho d^2 (L + c_p(T_s - T_0))}{J_0} \quad (13)$$

$t = 0.5$ ms;

L - căldura latentă de topire ;

$L=3.44 \times 10^4$ J/cm²

Pentru a elabora graficul din figura 7.3 folosim formula (1):

$$T - T_0 = \frac{2I_0}{k} \left(\frac{\alpha \cdot t}{\pi} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} - \frac{I_0 z}{k} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2(\alpha \cdot t)^{1/2}} \right)$$

$T_0 \approx 300$ K; $T_v = 3250$ K; $T_t = 2500$ K

Se calculează care este adâncimea de perforare z la timpul $t=0.5$ ms și temperatura

$T_v = 3250$ K.

Aplicând formula (1) se obține $z = 0.096$ mm. Se calculează adâncimea z pentru

$T_t = 2500$ K la timpul $t = 0.5$. În acest caz $z = 0.180$ mm.

În mod similar se calculează z pentru timpul $t=0.3$ ms la temperaturile de vaporizare și de topire:

- pentru $t=0.3$ ms; $T_v=3250$ K; $z=0.040$ mm
- pentru $t=0.3$ ms; $T_t=2500$ K; $z=0.082$ mm

Pentru $t=0.1$ ms nu se mai atinge temperatura de vaporizare, iar la $T_t=2500$ K, $z = 0.042$ mm.

Pentru $t=0.05$ ms nu se mai atinge nici T_v și nici T_t .

Având aceste date se pot concepe izotermele din figura 6.7.

Analizând figura 6.7. se observă că după 0.1 ms corindonul începe să se topească. La 0.5 ms adâncimea de $140 \mu\text{m}$ din material este în stare lichidă și restul solidă. În partea lichidă a materialului adâncimea de $96 \mu\text{m}$ este la temperatura de vaporizare. În regiunea solidă a lagărului o adâncime de $40 \mu\text{m}$ este la temperatura de topire.

În concluzie, analizând capitolele 6 și 7 se observă că posibilitatea de modificare a microalezajelor sunt variate și dependente între ele.

După cum s-a arătat diametrul fascicolului laser în general este de 0.8 mm. Experimental se observă că diametrul mediu al microalezajului este mai mic decât diametrul fascicolului laser datorită pierderilor variate de energie.

Posibilitățile suplimentare de dirijare a configurației microalezajelor rezultă din aplicarea succesivă pe suprafața de prelucrat a mai multor impulsuri laser (vezi capitolul 7). Se obține în principal o creștere semnificativă, dar limitată a adâncimii microalezajelor, ceea ce se explică prin creșterea treptată a pierderilor de energie datorate fenomenelor de diafragmare provocate de condensarea vaporilor și respectiv de reflexie a fascicolului laser pe pereții microalezajului în formare, pâna la diminuarea intensității incidente sub limita de prag.

Experimental s-a constatat că forma microalezajului obținut prin prelucrare cu fascicul laser este asemănătoare cu distribuția spațială a densității de energie Φ [J/cm^2], figura 6.8.

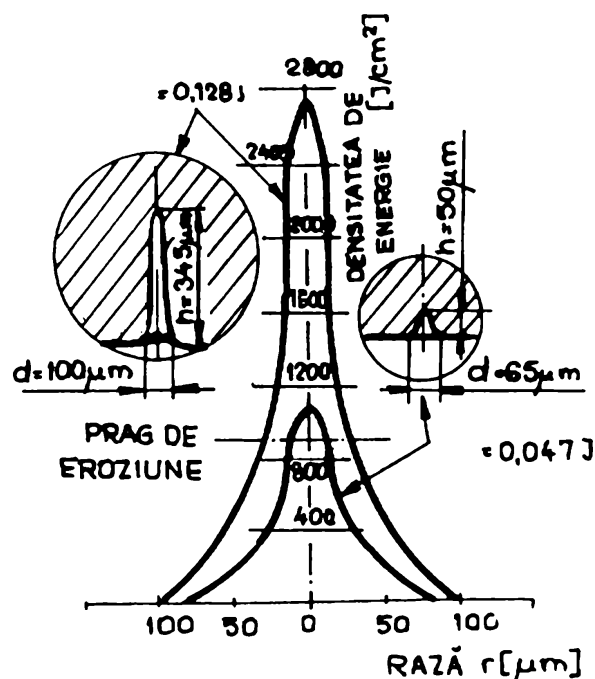


Fig. 6.8

Dirijarea alurei curbei $\Phi(r)$, în vederea obținerii unor microalezaje de configurație dorită, presupune modificarea densității de energie și a ariei suprafeței de interacțiune fascicul-obiect supus prelucrării, ceea ce se poate realiza practic prin:

- diafragmarea fasciculului nefocalizat
- modificarea lungimii focale a sistemului optic de concentrare a fasciculului
- deplasarea suprafeței de prelucrat în afara planului de focalizare a fasciculului (defocalizare)

În cazul utilizării laserului de la I.A.E.M. Timișoara, cea mai simplă soluție de modificare a ariei suprafeței de interacțiune fascicul-lagăr, este defocalizarea, care se obține, fig. 6.1, prin deplasarea mesei de lucru pe care se află poziționat lagărul care se străpunge cu laser, de-a lungul axei OZ. Planul focal în acest caz poate fi în interiorul piesei, pe suprafața exterioară a piesei sau în exteriorul piesei.

Influența densității de energie și a numărului de impulsuri reglate prin modificarea parametrilor instalației laser și a dimensiunilor petei focale reglate prin defocalizare, asupra microcristalelor prelucrate cu fascicul laser în regim de impulsuri, este analizată în capitolul următor.

7. Analiza statistică a parametrilor fasciculului laser cu scopul de a optimiza prelucrarea microalezajelor în lagărele de safire și rubine

Pentru a se minimiza adausurile de prelucrare în cazul prelucrării microalezajelor cu fascicul laser, pentru a se obține alezaje a căror formă este cât mai apropiată de forma cilindrică și pentru a îmbunătăți eficiența economică de prelucrare a microalezajelor, s-a realizat un experiment utilizând lagăre de alunecare plane din safire și rubine, pentru mecanica fină.

Pentru ca experimentul să poată fi efectuat în condiții convenabile din punct de vedere al costului și volumului de măsurări, este necesară minimizarea numărului de încercări sau, mai corect, optimizarea experimentului; este deci necesară o selecție preliminară a factorilor semnificativi și ordonarea lor după influența exercitată asupra sistemului studiat. Ca metode de selectare și ierarhizare a factorilor semnificativi și excluderea din experiment a factorilor ne semnificativi se utilizează cel mai frecvent: metoda analizei dispersionale și metoda balanței aleatoare [96].

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

Metoda balanței aleatoare realizează ușor, rapid și economic selectarea și ierarhizarea factorilor semnificativi, restul factorilor fiind integrați în “zgomotul de fond” al experimentului.

Pentru determinarea condițiilor optime de desfășurare a unui proces tehnologic este necesar să se obțină modelul matematic al experimentului, care descrie procesul tehnologic, sub forma unor funcții liniare de răspuns. Cu ajutorul funcțiilor liniare de răspuns se va căuta în continuare domeniul optim [66], [88].

Pentru a realiza modelul matematic al experimentului, la dispoziția cercetătorului stau două strategii principiale diferite:

- strategia clasică caracterizată prin sloganul “un factor la un moment dat”
- strategia modernă, metoda experimentului factorial, caracterizată prin sloganul “toți factorii în fiecare moment”.

Strategia clasică reduce orice cercetare experimentală la o cercetare unifactorială,

în sensul că, la un moment dat se modifică un singur factor; pentru ceilalți factori existenți se atribuie valori constante, mai mult sau mai puțin arbitrare, care pot exercita o influență semnificativă asupra rezultatului obținut. Pentru evidențierea influenței unui factor, se utilizează numai o parte a încercărilor experimentale, ceea ce amplifică semnificativ, în cazul unui număr mare de factori de influență, volumul experimentării.

Strategia modernă, metoda experimentului factorial se caracterizează prin faptul că la fiecare încercare se modifică dirijat valoarea tuturor factorilor existenți; în consecință, influența fiecărui factor asupra valorilor X, Y, Z ale funcțiilor de răspuns este determinată de toate încercările incluse în cercetarea experimentală. Volumul experimentului este în acest caz mult mai redus, iar certitudinea rezultatelor este mai ridicată. De asemenea în acest caz modelul matematic liniar inițial conține și informații asupra direcției în care se găsește valoarea extremă a funcției de răspuns, deci permite înaintarea spre zona optimului. Alegerea corectă a nivelurilor zero, centrul experimentului și a intervalelor de variație ale factorilor au o importanță hotărâtoare asupra eficienței modelului matematic.

După ce s-a stabilit modelul matematic al experimentului ce modelează procesul tehnologic, în cazul de față prelucrarea cu fascicul laser a alezajelor în lagărele din safir și rubine, se trece la etapa următoare, căutarea domeniului optim.

În cazul analizat, prin domeniu optim se înțeleg acele valori ale parametrilor fasciculului laser pentru care alezajul care se obține are forma circulară, este cât mai apropiat de forma cilindrică, deci adaosul de prelucrare este mic, iar eficiența economică de prelucrare este ridicată.

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

Metoda gradientului se mai numește și metoda ascensiunii rapide, are ca bază de plecare punctul central al experimentului factorial.

Pe parcursul deplasării se stabilesc experimental, la fiecare pas, valorile rezultate ale funcției de răspuns. Deplasarea continuă până la găsirea unui extrem local. Acest punct reprezintă centrul unui nou experiment factorial, care va furniza un nou model liniar, corespunzător noilor condiții.

Noul experiment factorial poate fi folosit în continuare la optimizarea procesului tehnologic, aplicându-se încă o dată metoda gradientului.

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

Metoda simplexurilor constă în stabilirea coordonatelor vârfurilor simplexului sub forma unor matrici. Din punct de vedere geometric, simplexul reprezintă un poliedru convex, corespunzător numărului de factori k , ai sistemului. Simplexul posedă o proprietate importantă; în cadrul său poate fi înlăturat un vârf și construit un alt simplex, pe baza unui nou vârf simetric cu cel înlăturat. Folosind rezultatele obținute se înlătură din simplex vârfurile (încercarea) cu cea mai neconvenabilă valoare a funcției de răspuns și se construiește un nou simplex, cu ajutorul unui nou vârf, simetric cu cel înlăturat. Se realizează experimentarea corespunzător noului simplex, se identifică vârfurile cu valoarea cea mai neconvenabilă a funcției de răspuns, se înlătură și se înlocuiește cu simetricul său, în oglindă în cadrul planului simplex următor ș.a.m.d. [66], [89].

Prin repetarea acestei proceduri se obține un lanț de simplexuri, care se deplasează către optim (extrem). Atingerea zonei de optim este indicată de rotirea simplexului în jurul unui punct (vârf) ce corespunde celei mai convenabile valori a funcției de răspuns.

Experimentul care descrie procesul tehnologic de prelucrare cu fascicul laser a

microalezajelor a fost realizat concret pe instalația de la I.A.E.M. Timișoara, cu ajutorul tehnicianului Vichente Horvath.

Pentru realizarea experimentului s-au prelucrat cu fascicul laser alezaje în 840 lagăre plane din safire și rubine cu $\phi 2,4$ mm și înălțimea 1,8 mm.

Studiind instalația laser de la I.A.E.M. Timișoara, fig. 6.1, parametrii care pot fi variați și care influențează forma alezajului și eficiența de prelucrare a alezajului sunt: capacitatea sistemului de pompaj, tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj, numărul de impulsuri aplicate și deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fascicului laser. Acești parametri sunt considerați parametri de intrare ai experimentului, au fost notați cu A, B, C, D și au următoarele valori:

- A - capacitatea sistemului de pompaj stabilită la nivelele 1 ($500 \mu\text{F}$) și 2 ($1000 \mu\text{F}$);
- B - tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj stabilită la nivelele 1 (1100 V); 2 (1400 V); 3 (1500 V); 4 (1600 V).
- C - numărul de impulsuri aplicate, stabilit la nivelele 1 (1 impuls); 2 (2 impulsuri); 3 (3 impulsuri) și 4 (4 impulsuri);
- D - deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fascicului laser, stabilită la nivelele 1 (-1,2 mm); 2 (-0,6 mm); 3 (0 mm); 4 (+0,6 mm); 5 (+1,2 mm).

Nivelele 1 și 2 sunt considerate în exteriorul piesei, la nivelul 3 planul focal este chiar pe suprafața piesei, iar la nivelele 4 și 5 planul focal este în interiorul piesei.

Fiecărei variabile independente A, B, C, D i se atribuie un număr de nivele de variație, cu atât mai mare cu cât informațiile apriorice o consideră mai importantă pentru procesul tehnologic de prelucrare cu laser a microalezajelor.

Ca funcții de răspuns a procesului de prelucrare a microalezajelor au fost considerate conform figurii 7.1, variabilele X, Y și Z.

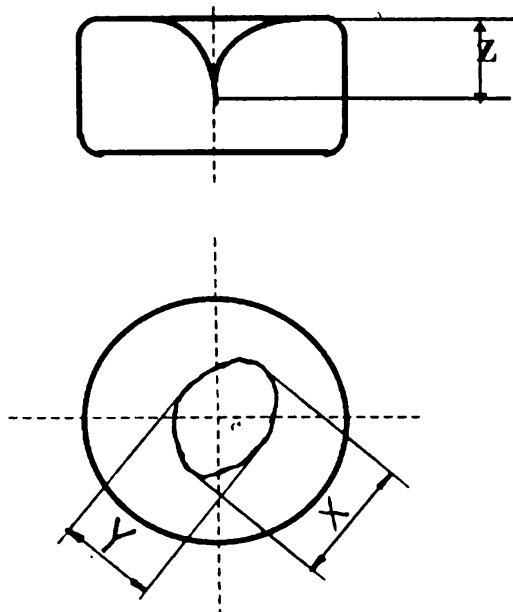


Fig. 7.1

- X - diametrul maxim de intrare al microalezajului
- Y - diametrul minim de intrare al microalezajului
- Z - adâncimea microalezajului

Parcurgându-se toate nivelurile factorilor de influență, s-a hotărât ca numărul determinărilor paralele să fie patru, $n = 4$.

Rezultatele acestui experiment sunt expuse în tabelul 1, Studiind datele evidențiate de acest tabel se constată că reproductibilitatea rezultatelor este destul de bună.

Măsurarea elementelor geometrice ale microalezajelor prelucrate s-a făcut cu ajutorul unui proiector de construcție ZEISS, la o mărire de 100 de ori, lagărele fiind imersate în iodură de metilen ($\text{CH}_2\text{-I}_2$), pentru a se vizualiza alezajul.

La realizarea experimentului s-au utilizat un număr mare de încercări, 840, pentru a epuiza toate combinațiile, celor patru variabile independente și pentru a obține o paletă largă de date din care să se poată alege aleator încercările de care este nevoie pentru aplicarea metodei balanței aleatoare și a experimentului factorial complet, 2^4 .

S-a ales metoda balanței aleatoare pentru că este cea mai rapidă și economică metodă de selectare și ierarhizare a factorilor semnificativei [66], [88]. Pentru a stabili modelul matematic al experimentului s-a utilizat experimentul factorial complet, deoarece dispunem de numărul de încercări necesare pentru aplicarea acestei metode și deoarece aceasta metodă permite o ascensiune rapidă spre zona optimului, prin utilizarea metodei gradientului ca metodă de optimizare.

Pentru aplicarea metodei balanței aleatoare se determină volumul experimentării, N , ca cel mai mic multiplu comun al numărului de nivele ale tuturor factorilor.

În cazul nostru variabila independentă A are 2 nivele, variabila independentă B are 4 nivele, iar variabila independentă C are 4 nivele iar variabila independentă D are 5 nivele; deci N , numărul încercărilor experimentale este 20.

S-au realizat matricile program ale experimentului în mod separat, pentru fiecare funcție de răspuns X, Y și Z în parte atât pentru lagărele de safir cât și pentru cele de rubin, alegându-se de fiecare dată în mod aleator din tabelul 1 un număr de 20 de încercări. Pentru funcțiile de răspuns X, Y și Z s-au utilizat valorile medii.

Tabelul nr. 1

A	B	C	D	MAT.	X1	X2	X3	X4	MEDIE	Y1	Y2	Y3	Y4	MEDIE	Z1	Z2	Z3	Z4	MEDIE
1	2	2	1	Safir	0.098	0.069	0.07	0.092	0.082	0.080	0.062	0.068	0.089	0.074	0.100	0.110	0.132	0.136	0.119
1	2	2	1	Rubin	0.060	0.068	0.091	0.088	0.076	0.060	0.062	0.072	0.082	0.069	0.106	0.115	0.128	0.130	0.119
1	2	2	2	Safir	0.100	0.098	0.104	0.106	0.102	0.088	0.110	0.103	0.083	0.096	0.222	0.275	0.229	0.262	0.247
1	2	2	2	Rubin	0.106	0.104	0.096	0.102	0.102	0.088	0.086	0.098	0.104	0.094	0.282	0.232	0.276	0.240	0.255
1	2	2	3	Safir	0.105	0.096	0.090	0.110	0.100	0.100	0.090	0.086	0.093	0.092	0.202	0.232	0.241	0.215	0.222
1	2	2	3	Rubin	0.096	0.090	0.108	0.102	0.099	0.088	0.072	0.085	0.091	0.084	0.222	0.202	0.232	0.219	0.218
1	2	2	4	Safir	0.090	0.093	0.102	0.107	0.098	0.090	0.087	0.092	0.059	0.082	0.327	0.259	0.261	0.269	0.279
1	2	2	4	Rubin	0.100	0.092	0.118	0.122	0.108	0.089	0.090	0.103	0.086	0.092	0.266	0.301	0.261	0.304	0.283
1	2	2	5	Safir	0.093	0.079	0.065	0.090	0.090	0.081	0.065	0.091	0.065	0.080	0.200	0.198	0.196	0.172	0.191
1	2	2	5	Rubin	0.085	0.065	0.095	0.099	0.087	0.080	0.061	0.090	0.090	0.080	0.168	0.172	0.181	0.188	0.177
1	2	3	1	Safir	0.110	0.121	0.103	0.106	0.110	0.105	0.111	0.100	0.098	0.103	0.339	0.336	0.358	0.361	0.324
1	2	3	1	Rubin	0.105	0.111	0.119	0.103	0.109	0.096	0.103	0.106	0.091	0.099	0.328	0.323	0.351	0.355	0.339
1	2	3	2	Safir	0.123	0.109	0.127	0.113	0.118	0.105	0.101	0.113	0.107	0.106	0.372	0.377	0.353	0.355	0.275
1	2	3	2	Rubin	0.128	0.122	0.109	0.113	0.118	0.119	0.113	0.101	0.105	0.109	0.381	0.388	0.342	0.347	0.279
1	2	3	3	Safir	0.122	0.101	0.118	0.117	0.114	0.100	0.098	0.105	0.107	0.102	0.269	0.277	0.253	0.257	0.264
1	2	3	3	Rubin	0.103	0.121	0.121	0.132	0.119	0.098	0.103	0.107	0.119	0.106	0.255	0.276	0.281	0.263	0.268
1	2	3	4	Safir	0.132	0.137	0.139	0.142	0.137	0.123	0.117	0.130	0.132	0.125	0.443	0.412	0.447	0.421	0.430
1	2	3	4	Rubin	0.145	0.148	0.152	0.129	0.143	0.129	0.132	0.135	0.118	0.128	0.434	0.424	0.444	0.401	0.425
1	2	3	5	Safir	0.121	0.128	0.131	0.139	0.129	0.111	0.115	0.122	0.122	0.117	0.358	0.332	0.321	0.372	0.345
1	2	3	5	Rubin	0.133	0.137	0.115	0.121	0.126	0.121	0.125	0.108	0.103	0.114	0.342	0.320	0.378	0.355	0.397
1	2	4	1	Safir	0.142	0.144	0.162	0.188	0.159	0.132	0.135	0.141	0.172	0.145	0.771	0.735	0.749	0.769	0.756
1	2	4	1	Rubin	0.155	0.172	0.161	0.153	0.160	0.145	0.158	0.152	0.144	0.149	0.767	0.773	0.752	0.758	0.762
1	2	4	2	Safir	0.161	0.168	0.198	0.217	0.189	0.092	0.096	0.135	0.125	0.165	0.688	0.687	0.685	0.696	0.689
1	2	4	2	Rubin	0.166	0.169	0.170	0.167	0.168	0.126	0.128	0.146	0.152	0.148	0.778	0.816	0.812	0.785	0.798
1	2	4	3	Safir	0.172	0.177	0.181	0.202	0.183	0.135	0.142	0.151	0.164	0.152	0.698	0.673	0.695	0.703	0.692
1	2	4	3	Rubin	0.193	0.198	0.161	0.175	0.181	0.183	0.173	0.141	0.165	0.165	0.688	0.687	0.685	0.696	0.689
1	2	4	4	Safir	0.153	0.155	0.176	0.172	0.162	0.092	0.098	0.132	0.118	0.110	0.820	0.862	0.815	0.859	0.839
1	2	4	4	Rubin	0.150	0.145	0.164	0.177	0.159	0.102	0.098	0.139	0.149	0.122	0.844	0.876	0.839	0.839	0.863
1	2	4	5	Safir	0.143	0.152	0.132	0.168	0.148	0.121	0.122	0.115	0.143	0.125	0.775	0.767	0.748	0.742	0.758
1	2	4	5	Rubin	0.158	0.155	0.138	0.159	0.152	0.132	0.139	0.128	0.141	0.135	0.789	0.802	0.791	0.777	0.789
1	3	2	1	Safir	0.226	0.198	0.231	0.218	0.219	0.162	0.168	0.159	0.158	0.161	0.321	0.281	0.299	0.301	0.300
1	3	2	1	Rubin	0.221	0.202	0.198	0.222	0.210	0.178	0.168	0.174	0.176	0.174	0.526	0.469	0.498	0.501	0.498
1	3	3	2	Safir	0.212	0.201	0.198	0.212	0.205	0.162	0.161	0.164	0.158	0.161	0.902	0.892	0.842	0.868	0.877
1	3	3	2	Rubin	0.204	0.188	0.201	0.196	0.197	0.165	0.171	0.159	0.164	0.164	0.892	0.832	0.846	0.859	0.857
1	3	3	3	Safir	0.220	0.223	0.208	0.226	0.219	0.182	0.179	0.176	0.184	0.180	0.803	0.822	0.812	0.809	0.811
1	3	3	3	Rubin	0.212	0.219	0.218	0.216	0.216	0.161	0.169	0.172	0.169	0.167	0.793	0.758	0.791	0.788	0.782
1	3	3	4	Safir	0.222	0.242	0.238	0.233	0.233	0.202	0.172	0.212	0.168	0.188	0.851	0.921	0.912	0.806	0.872
1	3	3	4	Rubin	0.206	0.186	0.189	0.213	0.198	0.192	0.186	0.180	0.202	0.190	0.912	0.891	0.902	0.911	0.904
1	3	3	5	Safir	0.242	0.246	0.202	0.222	0.228	0.208	0.166	0.192	0.201	0.197	0.762	0.782	0.778	0.792	0.778
1	3	3	5	Rubin	0.282	0.262	0.242	0.220	0.251	0.206	0.192	0.182	0.198	0.194	0.806	0.795	0.796	0.810	0.801
1	3	4	1	Safir	0.221	0.198	0.202	0.192	0.203	0.163	0.159	0.168	0.161	0.162	0.821	0.828	0.830	0.811	0.822
1	3	4	1	Rubin	0.202	0.232	0.212	0.222	0.217	0.166	0.152	0.160	0.166	0.166	0.802	0.810	0.798	0.828	0.809
1	3	4	2	Safir	0.308	0.301	0.303	0.322	0.324	0.192	0.195	0.236	0.217	0.210	0.933	0.928	0.972	0.979	0.953

A	B	C	D	MAT.	X1	X2	X3	X4	MEDIE	Y1	Y2	Y3	Y4	MEDIE	Z1	Z2	Z3	Z4	MEDIE
1	3	4	2	Rubin	0.232	0.237	0.258	0.253	0.245	0.247	0.249	0.231	0.213	0.235	1.016	0.976	1.009	0.975	0.994
1	3	4	3	Safir	0.281	0.245	0.238	0.205	0.242	0.165	0.155	0.162	0.163	0.161	1.011	0.915	0.895	0.880	0.925
1	3	4	3	Rubin	0.232	0.221	0.242	0.228	0.230	0.160	0.158	0.155	0.164	0.159	0.985	0.950	0.945	0.890	0.942
1	3	4	4	Safir	0.298	0.296	0.265	0.269	0.282	0.188	0.189	0.199	0.168	0.184	1.085	1.079	1.120	1.124	1.102
1	3	4	4	Rubin	0.210	0.208	0.231	0.211	0.215	0.172	0.176	0.215	0.225	0.197	0.079	1.045	1.081	1.035	1.060
1	3	4	5	Safir	0.248	0.224	0.264	0.258	0.248	0.183	0.182	0.169	0.186	0.180	1.102	1.023	1.123	1.128	1.094
1	3	4	5	Rubin	0.281	0.268	0.271	0.278	0.234	0.202	0.212	0.198	0.220	0.208					
1	4	2	1	Safir	0.202	0.198	0.212	0.210	0.205	0.161	0.159	0.158	0.162	0.160	0.708	0.651	0.645	0.646	0.662
1	4	2	1	Rubin	0.212	0.196	0.192	0.216	0.204	0.168	0.155	0.154	0.166	0.160	0.693	0.558	0.523	0.592	0.591
1	4	2	2	Safir	0.212	0.204	0.198	0.211	0.206	0.161	0.158	0.155	0.163	0.159	0.408	0.399	0.411	0.413	0.407
1	4	2	2	Rubin	0.203	0.208	0.196	0.210	0.204	0.168	0.172	0.166	0.161	0.166	0.481	0.466	0.473	0.470	0.472
1	4	2	3	Safir	0.221	0.218	0.219	0.225	0.220	0.161	0.172	0.165	0.173	0.167	0.823	0.812	0.819	0.821	0.818
1	4	2	3	Rubin	0.219	0.223	0.220	0.218	0.220	0.164	0.159	0.178	0.172	0.168	0.805	0.780	0.799	0.823	0.801
1	4	2	4	Safir	0.213	0.198	0.195	0.205	0.202	0.161	0.173	0.177	0.168	0.169	0.823	0.801	0.795	0.783	0.800
1	4	2	4	Rubin	0.208	0.191	0.183	0.197	0.194	0.163	0.171	0.163	0.166	0.165	0.789	0.811	0.732	0.775	0.776
1	4	2	5	Safir	0.242	0.235	0.243	0.238	0.239	0.201	0.198	0.211	0.185	0.198	0.621	0.628	0.598	0.633	0.620
1	4	2	5	Rubin	0.212	0.218	0.221	0.233	0.221	0.162	0.168	0.166	0.193	0.172	0.589	0.581	0.588	0.612	0.592
1	4	3	1	Safir	0.218	0.246	0.232	0.239	0.232	0.142	0.201	0.198	0.178	0.179	0.612	0.562	0.618	0.598	0.597
1	4	3	1	Rubin	0.282	0.262	0.252	0.279	0.228	0.202	0.221	0.196	0.190	0.202	0.583	0.608	0.621	0.610	0.605
1	4	3	2	Safir	0.241	0.250	0.249	0.252	0.248	0.202	0.200	0.198	0.209	0.202	0.952	0.957	0.962	0.948	0.954
1	4	3	2	Rubin	0.232	0.238	0.240	0.235	0.236	0.185	0.189	0.181	0.197	0.188	0.921	0.918	0.916	0.929	0.921
1	4	3	3	Safir	0.241	0.243	0.235	0.251	0.242	0.212	0.192	0.198	0.201	0.200	0.982	0.935	0.968	0.973	0.970
1	4	3	3	Rubin	0.238	0.232	0.248	0.244	0.240	0.198	0.193	0.212	0.212	0.203	0.989	0.983	0.978	0.968	0.979
1	4	3	4	Safir	0.232	0.238	0.229	0.225	0.231	0.161	0.173	0.175	0.177	0.171	0.921	0.932	0.933	0.911	0.924
1	4	3	4	Rubin	0.241	0.245	0.239	0.235	0.240	0.208	0.213	0.175	0.183	0.194	0.922	0.926	0.923	0.918	0.922
1	4	3	5	Safir	0.315	0.312	0.298	0.344	0.317	0.242	0.232	0.211	0.232	0.229	0.827	0.832	0.835	0.833	0.831
1	4	3	5	Rubin	0.243	0.302	0.306	0.252	0.275	0.217	0.225	0.232	0.215	0.222	0.821	0.813	0.825	0.819	0.819
1	4	4	1	Safir	0.282	0.269	0.257	0.279	0.276	0.223	0.232	0.242	0.238	0.233	0.823	0.842	0.851	0.832	0.837
1	4	4	1	Rubin	0.273	0.265	0.266	0.281	0.271	0.169	0.173	0.177	0.171	0.172	0.828	0.882	0.848	0.844	0.850
1	4	4	2	Safir	0.232	0.228	0.236	0.234	0.232	0.162	0.169	0.172	0.178	0.170	0.881	0.889	0.892	0.798	0.865
1	4	4	2	Rubin	0.201	0.212	0.219	0.222	0.213	0.160	0.163	0.183	0.169	0.168	0.811	0.819	0.863	0.878	0.842
1	4	4	3	Safir	0.243	0.252	0.288	0.273	0.264	0.169	0.172	0.177	0.168	0.171	0.982	0.921	0.953	0.966	0.955
1	4	4	3	Rubin	0.213	0.242	0.248	0.253	0.239	0.166	0.160	0.176	0.182	0.171	0.901	0.922	0.931	0.928	0.920
1	4	4	4	Safir	0.248	0.253	0.255	0.250	0.251	0.203	0.198	0.212	0.222	0.208					
1	4	4	4	Rubin	0.232	0.258	0.256	0.255	0.250	0.213	0.219	0.221	0.228	0.220					
1	4	4	5	Safir	0.283	0.279	0.285	0.289	0.286	0.202	0.212	0.223	0.232	0.217	0.931	0.921	0.928	0.932	0.928
1	4	4	5	Rubin	0.278	0.277	0.288	0.281	0.281	0.212	0.228	0.225	0.238	0.225	0.910	0.902	0.915	0.918	0.911
2	1	1	1	Safir	0.121	0.118	0.110	0.123	0.118	0.082	0.079	0.073	0.089	0.080	0.081	0.072	0.088	0.081	0.080
2	1	1	1	Rubin	0.113	0.110	0.121	0.122	0.116	0.088	0.081	0.091	0.083	0.085	0.083	0.078	0.071	0.091	0.080
2	1	1	2	Safir	0.165	0.163	0.161	0.178	0.280	0.113	0.102	0.121	0.123	0.114	0.183	0.168	0.143	0.155	0.162
2	1	1	2	Rubin	0.163	0.142	0.153	0.155	0.153	0.108	0.103	0.113	0.103	0.106	0.142	0.166	0.153	0.172	0.158
2	1	1	3	Safir	0.241	0.283	0.273	0.239	0.259	0.205	0.198	0.175	0.183	0.190	0.405	0.358	0.423	0.369	0.388
2	1	1	3	Rubin	0.248	0.252	0.244	0.223	0.241	0.163	0.166	0.171	0.168	0.167	0.358	0.303	0.401	0.368	0.377
2	1	1	4	Safir	0.163	0.203	0.168	0.172	0.176	0.121	0.183	0.128	0.123	0.138	0.221	0.282	0.257	0.262	0.260
2	1	1	4	Rubin	0.203	0.242	0.238	0.232	0.228	0.189	0.125	0.136	0.145	0.148	0.192	0.293	0.285	0.250	0.255

A	B	C	D	MAT.	X1	X2	X3	X4	MEDIE	Y1	Y2	Y3	Y4	MEDIE	Z1	Z2	Z3	Z4	MEDIE
2	1	1	5	Safir	0.163	0.148	0.153	0.156	0.155	0.083	0.091	0.088	0.086	0.087	0.023	0.028	0.011	0.012	0.018
2	1	1	5	Rubin	0.151	0.158	0.142	0.144	0.148	0.079	0.077	0.069	0.075	0.075	0.018	0.021	0.013	0.015	0.017
2	1	2	1	Safir	0.213	0.218	0.223	0.219	0.218	0.163	0.172	0.166	0.183	0.171	0.231	0.282	0.221	0.232	0.241
2	1	2	1	Rubin	0.228	0.202	0.215	0.229	0.218	0.181	0.185	0.179	0.172	0.179	0.302	0.229	0.225	0.242	0.249
2	1	2	2	Safir	0.223	0.219	0.215	0.211	0.217	0.162	0.178	0.163	0.172	0.168	0.123	0.112	0.121	0.119	0.118
2	1	2	2	Rubin	0.169	0.173	0.183	0.177	0.175	0.123	0.133	0.141	0.144	0.135	0.161	0.141	0.144	0.133	0.144
2	1	2	3	Safir	0.213	0.168	0.173	0.177	0.182	0.163	0.131	0.133	0.152	0.144	0.623	0.651	0.703	0.693	0.667
2	1	2	3	Rubin	0.198	0.201	0.188	0.185	0.193	0.168	0.168	0.166	0.159	0.165	0.613	0.528	0.628	0.666	0.608
2	1	2	4	Safir	0.293	0.302	0.298	0.291	0.296	0.168	0.205	0.178	0.212	0.190	0.390	0.502	0.414	0.542	0.462
2	1	2	4	Rubin	0.281	0.265	0.278	0.290	0.278	0.202	0.163	0.182	0.210	0.189	0.362	0.442	0.482	0.495	0.445
2	1	2	5	Safir	0.242	0.253	0.248	0.252	0.248	0.210	0.223	0.211	0.203	0.211	0.261	0.221	0.289	0.285	0.263
2	1	2	5	Rubin	0.283	0.241	0.262	0.244	0.257	0.202	0.198	0.213	0.211	0.206	0.251	0.262	0.266	0.272	0.262
2	1	3	1	Safir	0.165	0.172	0.174	0.178	0.172	0.123	0.132	0.139	0.129	0.130	0.342	0.348	0.344	0.339	0.343
2	1	3	1	Rubin	0.168	0.166	0.182	0.169	0.171	0.121	0.133	0.135	0.128	0.129	0.328	0.352	0.356	0.349	0.346
2	1	3	2	Safir	0.283	0.263	0.271	0.286	0.275	0.213	0.162	0.179	0.189	0.185	0.502	0.565	0.511	0.535	0.528
2	1	3	2	Rubin	0.287	0.268	0.261	0.278	0.273	0.223	0.196	0.212	0.222	0.213	0.602	0.652	0.589	0.593	0.609
2	1	3	3	Safir	0.283	0.278	0.272	0.277	0.277	0.201	0.233	0.212	0.185	0.207	0.989	0.897	0.903	0.912	0.923
2	1	3	3	Rubin	0.248	0.253	0.262	0.244	0.251	0.221	0.215	0.198	0.188	0.205	0.952	0.932	0.932	0.928	0.936
2	1	3	4	Safir	0.328	0.246	0.262	0.266	0.275	0.281	0.202	0.211	0.226	0.230	0.981	0.953	0.993	0.981	0.977
2	1	3	4	Rubin	0.301	0.262	0.268	0.273	0.276	0.232	0.212	0.225	0.218	0.221	0.986	0.968	0.902	0.973	0.957
2	1	3	5	Safir	0.311	0.321	0.302	0.318	0.313	0.285	0.281	0.242	0.258	0.266	0.615	0.626	0.683	0.669	0.648
2	1	3	5	Rubin	0.305	0.291	0.318	0.298	0.303	0.286	0.245	0.285	0.232	0.262	0.703	0.698	0.675	0.688	0.691
2	1	4	1	Safir	0.212	0.198	0.223	0.195	0.207	0.163	0.148	0.158	0.155	0.156	0.821	0.883	0.872	0.832	0.852
2	1	4	1	Rubin	0.211	0.208	0.219	0.201	0.209	0.168	0.165	0.159	0.162	0.163	0.812	0.821	0.811	0.829	0.818
2	1	4	2	Safir	0.211	0.218	0.221	0.228	0.219	0.169	0.172	0.168	0.182	0.172	0.921	0.899	0.895	0.931	0.911
2	1	4	2	Rubin	0.232	0.221	0.225	0.238	0.229	0.182	0.188	0.181	0.165	0.179	0.911	0.895	0.883	0.928	0.904
2	1	4	3	Safir	0.361	0.421	0.385	0.392	0.389	0.245	0.263	0.256	0.250	0.253	1.282	1.313	1.310	1.293	1.299
2	1	4	3	Rubin	0.412	0.385	0.392	0.405	0.398	0.282	0.273	0.280	0.285	0.280					
2	1	4	4	Safir	0.412	0.408	0.411	0.398	0.407	0.351	0.382	0.362	0.358	0.362					
2	1	4	4	Rubin	0.381	0.391	0.339	0.403	0.393	0.328	0.332	0.342	0.368	0.342					
2	1	4	5	Safir	0.258	0.255	0.268	0.259	0.260	0.203	0.211	0.219	0.221	0.213	1.123	1.128	1.126	1.131	1.127
2	1	4	5	Rubin	0.262	0.268	0.253	0.251	0.258	0.223	0.218	0.209	0.215	0.216					
2	2	1	1	Safir	0.205	0.189	0.192	0.185	0.192	0.163	0.158	0.169	0.152	0.160	0.203	0.169	0.163	0.161	0.174
2	2	1	1	Rubin	0.195	0.210	0.203	0.198	0.201	0.161	0.153	0.159	0.168	0.160	0.208	0.178	0.185	0.172	0.185
2	2	1	2	Safir	0.240	0.231	0.239	0.248	0.239	0.188	0.173	0.168	0.171	0.175	0.205	0.243	0.239	0.237	0.231
2	2	1	2	Rubin	0.213	0.237	0.235	0.232	0.226	0.163	0.166	0.173	0.178	0.170	0.231	0.227	0.229	0.231	0.229
2	2	1	3	Safir	0.221	0.219	0.198	0.215	0.213	0.163	0.172	0.185	0.169	0.172	0.583	0.551	0.623	0.621	0.594
2	2	1	3	Rubin	0.212	0.189	0.185	0.219	0.201	0.161	0.177	0.171	0.179	0.172	0.612	0.579	0.609	0.589	0.599
2	2	1	4	Safir	0.262	0.266	0.258	0.255	0.260	0.161	0.173	0.165	0.211	0.177	0.583	0.632	0.612	0.573	0.600
2	2	1	4	Rubin	0.281	0.242	0.271	0.252	0.261	0.203	0.208	0.189	0.181	0.197	0.621	0.613	0.598	0.585	0.604
2	2	1	5	Safir	0.163	0.178	0.177	0.183	0.175	0.123	0.133	0.134	0.129	0.129	0.172	0.177	0.181	0.161	0.172
2	2	1	5	Rubin	0.211	0.168	0.172	0.188	0.184	0.141	0.122	0.135	0.134	0.134	0.169	0.182	0.160	0.182	0.173
2	2	2	1	Safir	0.221	0.202	0.211	0.205	0.209	0.168	0.171	0.166	0.169	0.168	0.543	0.559	0.498	0.532	0.533
2	2	2	1	Rubin	0.213	0.207	0.215	0.215	0.213	0.173	0.175	0.163	0.161	0.168	0.525	0.533	0.556	0.565	0.544
2	2	2	2	Safir	0.246	0.237	0.239	0.238	0.240	0.213	0.219	0.228	0.238	0.223	0.641	0.648	0.646	0.701	0.659

A	B	C	D	MAT.	X1	X2	X3	X4	MEDIE	Y1	Y2	Y3	Y4	MEDIE	Z1	Z2	Z3	Z4	MEDIE
2	2	2	2	Rubin	0.232	0.239	0.233	0.204	0.227	0.196	0.194	0.211	0.211	0.203	0.677	0.712	0.672	0.723	0.696
2	2	2	3	Safir	0.281	0.272	0.285	0.269	0.276	0.202	0.213	0.208	0.211	0.208	0.823	0.819	0.825	0.828	0.823
2	2	2	3	Rubin	0.271	0.276	0.286	0.263	0.274	0.213	0.221	0.228	0.219	0.221	0.750	0.780	0.829	0.815	0.793
2	2	2	4	Safir	0.208	0.211	0.225	0.232	0.219	0.200	0.208	0.210	0.190	0.212	0.666	0.659	0.703	0.696	0.681
2	2	2	4	Rubin	0.198	0.189	0.228	0.229	0.211	0.190	0.199	0.189	0.206	0.196	0.721	0.685	0.719	0.679	0.701
2	2	2	5	Safir	0.321	0.329	0.331	0.325	0.326	0.222	0.228	0.238	0.235	0.230	0.621	0.618	0.591	0.593	0.605
2	2	2	5	Rubin	0.312	0.322	0.319	0.311	0.316	0.232	0.238	0.231	0.223	0.231	0.581	0.583	0.598	0.601	0.590
2	2	3	1	Safir	0.402	0.321	0.385	0.391	0.374	0.282	0.280	0.289	0.271	0.280	0.935	0.981	1.023	0.985	0.958
2	2	3	1	Rubin	0.365	0.351	0.368	0.381	0.366	0.281	0.273	0.263	0.266	0.270	0.987	0.973	0.968	0.980	0.977
2	2	3	2	Safir	0.312	0.328	0.325	0.319	0.321	0.285	0.289	0.291	0.273	0.284	1.321	1.322	1.292	1.328	1.315
2	2	3	2	Rubin	0.322	0.331	0.329	0.313	0.323	0.288	0.281	0.287	0.277	0.283					
2	2	3	3	Safir	0.283	0.302	0.293	0.298	0.294	0.208	0.221	0.232	0.233	0.223	1.201	1.198	1.183	1.225	1.201
2	2	3	3	Rubin	0.302	0.292	0.308	0.287	0.297	0.241	0.228	0.246	0.239	0.238					
2	2	3	4	Safir	0.412	0.403	0.413	0.415	0.410	0.238	0.289	0.295	0.312	0.294	1.232	1.224	1.235	1.219	1.227
2	2	3	4	Rubin	0.423	0.421	0.425	0.418	0.421	0.302	0.311	0.308	0.313	0.308					
2	2	3	5	Safir	0.331	0.342	0.344	0.349	0.341	0.301	0.312	0.303	0.315	0.307	0.989	1.023	1.021	0.985	1.004
2	2	3	5	Rubin	0.323	0.348	0.352	0.344	0.341	0.298	0.315	0.318	0.321	0.313					
2	2	4	1	Safir	0.363	0.361	0.358	0.342	0.356	0.315	0.312	0.321	0.303	0.312	1.323	1.304	1.311	1.315	1.313
2	2	4	1	Rubin	0.381	0.344	0.351	0.371	0.361	0.328	0.310	0.318	0.322	0.319					
2	2	4	2	Safir	0.362	0.358	0.401	0.423	0.386	0.283	0.288	0.319	0.322	0.303	1.185	1.181	1.225	1.237	1.207
2	2	4	2	Rubin	0.312	0.319	0.335	0.338	0.326	0.296	0.312	0.316	0.292	0.304	1.202	1.196	1.235	1.235	1.217
2	2	4	3	Safir	0.312	0.321	0.318	0.315	0.316	0.223	0.219	0.221	0.212	0.218	1.328	1.332	1.321	1.318	1.324
2	2	4	3	Rubin	0.302	0.312	0.320	0.311	0.311	0.213	0.218	0.211	0.223	0.216					
2	2	4	4	Safir	0.322	0.328	0.366	0.356	0.343	0.271	0.277	0.310	0.334	0.298	1.339	1.337	1.299	1.301	1.319
2	2	4	4	Rubin	0.300	0.292	0.308	0.308	0.302	0.271	0.277	0.298	0.298	0.298	1.302	1.342	1.299	1.333	1.319
2	2	4	5	Safir	0.401	0.391	0.388	0.421	0.400	0.321	0.332	0.328	0.321	0.325	1.323	1.328	1.311	1.302	1.316
2	2	4	5	Rubin	0.431	0.423	0.405	0.421	0.420	0.302	0.311	0.319	0.322	0.313					
2	3	1	1	Safir	0.283	0.281	0.271	0.275	0.277	0.211	0.221	0.221	0.219	0.218	0.382	0.375	0.379	0.388	0.381
2	3	1	1	Rubin	0.279	0.277	0.273	0.282	0.277	0.213	0.218	0.223	0.226	0.220	0.402	0.413	0.385	0.373	0.393
2	3	1	2	Safir	0.285	0.291	0.299	0.281	0.290	0.204	0.209	0.211	0.215	0.209	0.328	0.412	0.415	0.383	0.384
2	3	1	2	Rubin	0.302	0.292	0.305	0.290	0.297	0.221	0.223	0.212	0.228	0.222	0.362	0.366	0.372	0.379	0.369
2	3	1	3	Safir	0.285	0.302	0.281	0.285	0.288	0.223	0.234	0.242	0.239	0.234	0.621	0.592	0.611	0.603	0.606
2	3	1	3	Rubin	0.312	0.291	0.278	0.308	0.297	0.248	0.233	0.231	0.243	0.238	0.581	0.612	0.593	0.615	0.600
2	3	1	4	Safir	0.231	0.241	0.238	0.231	0.235	0.153	0.168	0.172	0.178	0.170	0.658	0.642	0.655	0.639	0.648
2	3	1	4	Rubin	0.228	0.239	0.245	0.248	0.232	0.161	0.181	0.179	0.183	0.176	0.637	0.631	0.648	0.644	0.640
2	3	1	5	Safir	0.263	0.271	0.259	0.266	0.264	0.193	0.219	0.198	0.211	0.205	0.213	0.169	0.203	0.198	0.195
2	3	1	5	Rubin	0.313	0.281	0.269	0.277	0.285	0.203	0.223	0.215	0.232	0.218	0.182	0.193	0.195	0.187	0.189
2	3	2	1	Safir	0.363	0.347	0.352	0.359	0.355	0.322	0.299	0.311	0.328	0.315	0.943	0.932	0.947	0.938	0.940
2	3	2	1	Rubin	0.321	0.368	0.325	0.353	0.341	0.285	0.293	0.325	0.318	0.305	0.983	0.951	0.942	0.962	0.959
2	3	2	2	Safir	0.310	0.305	0.299	0.258	0.293	0.286	0.290	0.275	0.273	0.281	0.832	0.836	0.888	0.868	0.856
2	3	2	2	Rubin	0.272	0.275	0.291	0.313	0.289	0.252	0.257	0.269	0.290	0.267	0.825	0.865	0.829	0.869	0.847
2	3	2	3	Safir	0.363	0.365	0.359	0.351	0.359	0.272	0.291	0.287	0.288	0.284	1.213	1.189	1.195	1.208	1.201
2	3	2	3	Rubin	0.361	0.355	0.356	0.371	0.363	0.308	0.297	0.281	0.311	0.299					
2	3	2	4	Safir	0.324	0.322	0.322	0.322	0.322	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.934	0.931	0.981	0.985	0.959
2	3	2	4	Rubin	0.324	0.322	0.322	0.322	0.322	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.934	0.931	0.981	0.985	0.959

A	B	C	D	MAT.	X1	X2	X3	X4	MEDIE	Y1	Y2	Y3	Y4	MEDIE	Z1	Z2	Z3	Z4	MEDIE
2	3	2	5	Safir	0.393	0.385	0.397	0.408	0.395	0.313	0.322	0.315	0.332	0.320	1.013	0.989	0.995	1.058	1.013
2	3	2	5	Rubin	0.412	0.415	0.421	0.389	0.409	0.328	0.336	0.342	0.328	0.333					
2	3	3	1	Safir	0.415	0.421	0.411	0.419	0.416	0.363	0.381	0.371	0.360	0.368					
2	3	3	1	Rubin	0.382	0.398	0.363	0.375	0.379	0.368	0.375	0.367	0.377	0.371					
2	3	3	2	Safir	0.368	0.361	0.367	0.371	0.366	0.321	0.311	0.325	0.313	0.317	1.338	1.342			
2	3	3	2	Rubin	0.329	0.335	0.352	0.359	0.343	0.281	0.292	0.305	0.318	0.299					
2	3	3	3	Safir	0.321	0.315	0.326	0.331	0.323	0.261	0.269	0.272	0.266	0.267					
2	3	3	3	Rubin	0.332	0.328	0.319	0.327	0.326	0.258	0.255	0.268	0.275	0.264					
2	3	3	4	Safir	0.367	0.355	0.349	0.344	0.353	0.311	0.323	0.303	0.259	0.308					
2	3	3	4	Rubin	0.342	0.358	0.361	0.347	0.352	0.288	0.282	0.311	0.297	0.294					
2	3	3	5	Safir	0.421	0.408	0.423	0.432	0.421	0.332	0.329	0.341	0.323	0.331	1.323	1.289	1.275	1.311	
2	3	3	5	Rubin	0.415	0.416	0.411	0.426	0.417	0.346	0.335	0.344	0.348	0.343					
2	3	4	1	Safir	0.424	0.432	0.429	0.415	0.425	0.368	0.359	0.361	0.372	0.365					
2	3	4	1	Rubin	0.423	0.428	0.434	0.431	0.429	0.362	0.353	0.382	0.352	0.362					
2	3	4	2	Safir	0.406	0.426	0.408	0.424	0.416	0.341	0.349	0.332	0.369	0.349	1.460	1.503	1.499	1.466	1.482
2	3	4	2	Rubin	0.371	0.378	0.396	0.407	0.368	0.350	0.373	0.353	0.372	0.362	1.481	1.486	1.446	1.439	1.463
2	3	4	3	Safir	0.381	0.394	0.386	0.408	0.392	0.311	0.321	0.327	0.332	0.322					
2	3	4	3	Rubin	0.385	0.368	0.411	0.395	0.389	0.328	0.311	0.337	0.329	0.326					
2	3	4	4	Safir	0.408	0.412	0.385	0.375	0.395	0.288	0.291	0.285	0.326	0.300	1.518	1.552	1.514	1.556	1.535
2	3	4	4	Rubin	0.360	0.365	0.372	0.363	0.365	0.321	0.328	0.366	0.365	0.345	1.506	1.546	1.509	1.531	1.523
2	3	4	5	Safir	0.442	0.461	0.458	0.466	0.456	0.413	0.421	0.411	0.421	0.416	1.226	1.243	1.262	1.255	1.246
2	3	4	5	Rubin	0.485	0.472	0.456	0.469	0.470	0.424	0.433	0.405	0.419	0.420					

Matricile experimentării, caracterizate prin distribuție aleatoare a nivelelor factorilor independenți și a ordinii de efectuare a încercărilor sunt prezentate în tabelele 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, și 7a.

Rezultatele calculelor în cele trei etape de ierarhizare precum și ordinea de importanță a celor patru factori analizați sunt date în tabelele 2b, 3b, 4b, 5b, 6b și 7b.

Tabel 2a
Safir , valori medii funcție de răspuns X

A	B	C	D	X
2	3	1	1	0.277
1	3	4	2	0.296
2	1	4	2	0.219
1	2	4	2	0.186
2	3	4	4	0.395
1	3	2	4	0.161
2	2	2	4	0.219
1	2	2	4	0.098
2	1	4	3	0.389
2	1	1	5	0.155
2	1	3	1	0.172
1	4	3	1	0.232
2	2	1	1	0.192
1	3	2	3	0.133
2	1	1	3	0.259
1	4	3	2	0.248
2	2	1	5	0.175
1	4	2	5	0.239
1	4	3	5	0.317
1	4	3	3	0.242

Pornind de la tabelul 2a, se calculează valorile medii ale funcției de răspuns pentru fiecare nivel al factorilor existenți, cu formula:

$$\bar{a}_1 = \frac{a_1 + a_1 + \dots}{N/2}; \bar{a}_2 = \frac{a_2 + a_2 + \dots}{N/2}$$

$$\bar{b}_1 = \frac{b_1 + b_1 + \dots}{N/4}; \bar{b}_2 = \frac{b_2 + b_2 + \dots}{N/4}; \bar{b}_3 = \frac{b_3 + b_3 + \dots}{N/4}$$

unde N este numărul încercărilor experimentale din tab. 2a, N=20. Cu valorile determinate se completează tabelul 2b.

Tabel 2b

Safir, valori medii funcție de răspuns X

Etape	Nr. factori de influenta	A	B	C	D
I	1	0.2152	0.2388	0.2116	0.2183
I	2	0.2455	0.174	0.17	0.2373
I	3	-	0.2524	0.2422	0.2558
I	4	-	0.2556	0.297	0.2183
I	5	-	-	-	0.2215
I	ΔV	0.0303	0.0816	0.127	0.0375
II	1	0.2211	0.2171	-	0.2216
II	2	0.2392	0.1922	-	0.1842
II	3	-	0.2535	-	0.2558
II	4	-	0.258	-	0.2467
II	5	-	-	-	0.2429
II	ΔV	0.0181	0.0658	-	0.0716
III	1	0.2189	0.2369	-	-
III	2	0.2414	0.1758	-	-
III	3	-	0.2516	-	-
III	4	-	0.2563	-	-
III	5	-	-	-	-
III	ΔV	0.0225	0.0905	-	-

Se calculează domeniile de variație ale valorilor medii ale funcției de răspuns, ΔV , determinate de diferența dintre valorile maxime și minime. Se ordonează factorii de influență în ordine descrescătoare a domeniilor de variație, reținându-se factorul cu ΔV_{\max} , ca factor de primă importanță pentru funcția de răspuns, X, analizată.

Se corectează rezultatele primare, măsurate, ale experimentului în raport cu influența exercitată de factorul de primă importanță, în cazul nostru C.

În acest scop, se adaugă la valorile inițiale individuale ale funcției de răspuns, X_1, \dots, X_N , în tabelul 2a pentru fiecare nivel dat al factorului de primă importanță, C, diferența algebrică, DA :

$$DA = \overline{X}_{global} - c_i, \quad i = 1, 4.$$

\overline{X}_{global} este media aritmetică a tuturor celor N valori X, în cazul analizat

$$\overline{X}_{global} = 0,2302.$$

Corecțiile se fac cu valorile:

etapa I, după coloana factorului C

$$0,2302 - 0,2116 = 0,0186; \text{ nivel 1}$$

$$0,2302 - 0,17 = 0,0602; \text{ nivel 2}$$

$$0,2302 - 0,2422 = -0,012; \text{ nivel 3}$$

$$0,2302 - 0,297 = -0,0668; \text{ nivel 4}$$

În urma corecției se obține o nouă matrice, care are de data aceasta doar 3 factori de influență și o nouă coloană X, corectată. Se determină iarăși, valorile medii ale funcției de răspuns, determinându-se factorul de importanță primară, între cei 3 rămași, în cazul analizat este factorul D și se efectuează corecția funcției de răspuns, X, în raport cu acest factor.

Corecțiile se fac după coloana factorului D

$$0,2302 - 0,2216 = 0,0086; \text{ nivel 1}$$

$$0,2302 - 0,1842 = 0,046; \text{ nivel 2}$$

$$0,2302 - 0,2558 = - 0,0256; \text{ nivel 3}$$

$$0,2302 - 0,2467 = - 0,0165; \text{ nivel 4}$$

$$0,2302 - 0,2429 = - 0,0127; \text{ nivel 5}$$

Se corectează din nou valorile X ale funcției de răspuns, după coloana D, rezultă un experiment cu doi factori de influență.

Se calculează din nou valorile medii ale funcției de răspuns și respectiv ΔV . Se constată că B este al treilea factor de influență. A, rămâne al patrulea factor de influență. În același mod se procedează pentru funcțiile de răspuns Y și Z în cazul lagărelor de safir și al lagărelor de rubin.

Tabel 3a

Safire, valori medii funcție de răspuns Y

A	B	C	D	Y
2	3	1	1	0.218
1	3	4	2	0.210
2	1	4	2	0.172
1	2	4	2	0.112
2	3	4	4	0.300
1	3	2	4	0.124
2	2	2	4	0.202
1	2	2	4	0.082
2	1	4	3	0.253
2	1	1	5	0.087
2	1	3	1	0.130
1	4	3	1	0.179
2	2	1	1	0.160
1	3	2	3	0.084
2	1	1	3	0.190
1	4	3	2	0.202
2	2	1	5	0.129
1	4	2	5	0.198
1	4	3	5	0.229
1	4	3	3	0.203

Tabel 3b

Safir , valori medii funcție de răspuns Y

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
I	1	0.1623	0.1664	0.1568	0.1718
I	2	0.1841	0.137	0.138	0.174
I	3	-	0.1872	0.1886	0.1825
I	4	-	0.2022	0.2094	0.177
I	5	-	-	-	0.1608
I	ΔV	0.0218	0.0652	0.0714	0.0218
II	1	0.163	0.1554	-	0.1723
II	2	0.1834	0.1504	-	0.143
II	3	-	0.1901	-	0.1825
II	4	-	0.1969	-	0.1944
II	5	-	-	-	0.1739
II	ΔV	0.0204	0.0465	-	0.0514
III	1	0.1652	0.1688	-	-
III	2	0.1812	0.1346	-	-
III	3	-	0.1831	-	-
III	4	-	0.2063	-	-
III	5	-	-	-	-
III	ΔV	0.016	0.0717	-	-

Observații :

Corecțiile se fac cu valorile :

- etapa I , după coloana factorului C :

$$0.1732-0.1568=0.0164$$

$$0.1732-0.138=0.0352$$

$$0.1732-0.1886=-0.0154$$

$$0.1732-0.2094=-0.0362$$

- etapa a II -a corecția se face după coloana factorului D

$$0.1732-0.1723=0.0009$$

$$0.1732-0.143=0.0302$$

$$0.1732-0.1825=-0.0093$$

$$0.1732-0.1944=-0.0212$$

$$0.1732-0.1739=-0.0007$$

Tabel 4a Safir , valori medii funcție de răspuns Z

A	B	C	D	Z
2	3	1	1	0.381
1	3	4	2	0.953
2	1	4	2	0.911
1	2	4	2	0.763
2	3	4	4	1.535
1	3	2	4	0.510

2	2	2	4	0.681
1	2	2	4	0.279
2	1	4	3	1.299
2	1	1	5	0.018
2	1	3	1	0.343
1	4	3	1	0.597
2	2	1	1	0.174
1	3	2	3	0.109
2	1	1	3	0.388
1	4	3	2	0.954
2	2	1	5	0.172
1	4	2	5	0.620
1	4	3	5	0.831
1	4	3	3	0.970

Tabel 4b

Safir , valori medii , funcție de răspuns Z

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
I	1	0.6584	0.5918	0.2266	0.3738
I	2	0.5902	0.4138	0.4398	0.8953
I	3	-	0.6976	0.7390	0.6915
I	4	-	0.7944	1.0922	0.7513
I	5	-	-	-	0.4103
I	ΔV	0.0684	0.3806	0.8656	0.5215
II	1	0.5930	0.5409	-	0.5154
II	2	0.7439	0.5532	-	0.5158
II	3	-	0.6639	-	0.6915
II	4	-	0.7396	-	0.7728
II	5	-	-	-	0.6267
II	ΔV	0.1509	0.1987	-	0.2574
III	1	0.6585	0.6080	-	-
III	2	0.5902	0.3975	-	-
III	3	-	0.6683	-	-
III	4	-	0.9362	-	-
III	5	-	-	-	-
III	ΔV	0.0683	0.5387	-	-

Observații :

Corecțiile se fac cu valorile :

- etapa I , după coloana factorului C

$$0.6244 - 0.2266 = 0.3978$$

$$0.6244 - 0.4398 = 0.1846$$

$$0.6244-0.7390=-0.1146$$

$$0.6244-1.0922=-0.4678$$

- etapa a II -a , corecția se face după coloana factorului D

$$0.6244-0.5154=0.109$$

$$0.6244-0.5158=0.1086$$

$$0.6244-0.6915=-0.0671$$

$$0.6244-0.7728=-0.1484$$

$$0.6244-0.6267=-0.0023$$

Tabel 5a

Rubin , valori medii , funcție de răspuns X

A	B	C	D	X
2	3	1	1	0.277
1	3	4	2	0.245
2	1	4	2	0.229
1	2	4	2	0.168
2	3	4	4	0.365
1	3	2	4	0.154
2	2	2	4	0.211
1	2	2	4	0.108
2	1	4	3	0.398
2	1	1	5	0.148
2	1	3	1	0.176
1	4	3	1	0.228
2	2	1	1	0.201
1	3	2	3	0.135
2	1	1	3	0.241
1	4	3	2	0.236
2	2	1	5	0.184
1	4	2	5	0.221
1	4	3	5	0.275
1	4	3	3	0.240

Tabel 5b

Rubin , valori medii , funcție de răspuns X

Etape	Nr factori de influență	A	B	C	D
I	1	0.201	0.2384	0.2102	0.2205
I	2	0.243	0.1744	0.1658	0.2195
I	3	-	0.2352	0.2310	0.2535
I	4	-	0.2400	0.2810	0.2095
I	5	-	-	-	0.2070
I	ΔV	0.042	0.0656	0.1152	0.0465

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
II	1	0.2081	0.2177	-	0.2219
II	2	0.2359	0.1898	-	0.1730
II	3	-	0.2364	-	0.2535
II	4	-	0.2440	-	0.2369
II	5	-	-	-	0.2247
II	ΔV	0.0278	0.0542	-	0.0805
III	1	0.2059	0.2351	-	-
III	2	0.2381	0.1777	-	-
III	3	-	0.2327	-	-
III	4	-	0.2424	-	-
III	5	-	-	-	-
III	ΔV	0.0322	0.0647	-	-

Observație :

Corecțiile se fac cu valorile :

- etapa I, după coloana factorului C:

$$0.222-0.2103=0.0118$$

$$0.222-0.1658=0.0562$$

$$0.222-0.231=-0.009$$

$$0.222-0.281=-0.059$$

- etapa a II -a, corecția se face după coloana factorului D

$$0.222-0.2219=0.0003$$

$$0.222-0.173=0.049$$

$$0.222-0.2535=-0.0315$$

$$0.222-0.2369=-0.0149$$

$$0.222-0.2247=-0.0027$$

Tabel 6a

Rubin, valori medii funcție de răspuns Y

A	B	C	D	Y
2	3	1	1	0.220
1	3	4	2	0.235
2	1	4	2	0.179
1	2	4	2	0.138
2	3	4	4	0.345
1	3	2	4	0.124
2	2	2	4	0.196
1	2	2	4	0.0092
2	1	4	3	0.280
2	1	4	3	0.280
2	1	1	5	0.075
2	1	3	1	0.129
1	4	3	1	0.202
2	2	1	1	0.160
1	3	2	3	0.084
2	1	1	3	0.167
1	4	3	2	0.188

A	B	C	D	Y
2	2	1	5	0.134
1	4	2	5	0.172
1	4	3	5	0.222
1	4	3	3	0.203

Tabel 6b

Rubin, valori medii, funcție de răspuns Y

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
I	1	0.166	0.166	0.1512	0.1778
I	2	0.1885	0.144	0.1336	0.185
I	3	-	0.2016	0.1888	0.1835
I	4	-	0.1974	0.2354	0.1893
I	5	-	-	-	0.1508
I	ΔV	0.0225	0.0576	0.1018	0.0385
II	1	0.1673	0.1509	-	0.1851
II	2	0.1873	0.1603	-	0.1386
II	3	-	0.2011	-	0.1836
II	4	-	0.1969	-	0.2075
II	5	-	-	-	0.1719
II	ΔV	0.020	0.0502	-	0.0689
III	1	0.1706	0.1707	-	-
III	2	0.1838	0.1392	-	-
III		-	0.1943	-	-
III	3	-	-	-	-
III	4	-	-	-	-
III	ΔV	0.0132	0.0653	-	-

Observatii:

Corectiile se fac cu valorile:

- etapa I, dupa coloana factorului C:

$$0.1773 - 0.1512 = 0.0261$$

$$0.1773 - 0.1336 = 0.0437$$

$$0.1773 - 0.1888 = -0.0115$$

$$0.1773 - 0.2354 = -0.0581$$

- etapa a II -a, corectia se face dupa coloana factorului D

$$0.1773 - 0.1851 = -0.0078$$

$$0.1773 - 0.1386 = 0.0387$$

$$0.1773 - 0.1836 = -0.0063$$

$$0.1773 - 0.2075 = -0.0302$$

$$0.1773 - 0.1719 = 0.0054$$

Tabelul 7a
Rubin, valori medii, funcție de răspuns Z

A	B	C	D	Z
2	3	1	1	0.393
1	3	4	2	0.994
2	1	4	2	0.904
1	2	4	2	0.798
2	3	4	4	1.523
1	3	2	4	0.529
2	2	2	4	0.701
1	2	2	4	0.283
2	1	4	3	1.308
2	1	1	5	0.017
2	1	3	1	0.346
1	4	3	1	0.605
2	2	1	1	0.185
1	3	2	3	0.101
2	1	1	3	0.377
1	4	3	2	0.921
2	2	1	5	0.173
1	4	2	5	0.592
1	4	3	5	0.819
1	4	3	3	0.979

Tabel 7b
Rubin, valori medii, funcție de răspuns Z

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
I	1	0.6621	0.5904	0.229	0.3823
I	2	0.5927	0.4280	0.4412	0.9043
I	3	-	0.708	0.734	0.6913
I	4	-	0.7832	1.1054	0.759
I	5	-	-	-	0.4003
I	ΔV	0.0694	0.3552	0.8764	0.5215
II	1	0.5983	0.5372	-	0.5282
II	2	0.6565	0.5662	-	0.5191
II	3	-	0.671	-	0.6913
II	4	-	0.7352	-	0.7792
II	5	-	-	-	0.6194
II	ΔV	0.0582	0.198	-	0.2601
III	1	0.663	0.6079	-	-

Etape	Nr. factori de influență	A	B	C	D
III	2	0.5918	0.4104	-	-
III	3	-	0.676	-	-
III	4	-	0.8151	-	-
III	5	-	-	-	-
III	ΔV	0.0712	0.4047	-	-

Observații:

Corecțiile se fac cu valorile:

- etapa I, după coloana factorului C

$$0.6274 - 0.229 = 0.3984$$

$$0.6274 - 0.4412 = 0.1862$$

$$0.6274 - 0.734 = -0.1066$$

$$0.6274 - 1.1054 = -0.478$$

- etapa a II - a, corecția se face după coloana factorului D

$$0.6274 - 0.5282 = 0.0992$$

$$0.6274 - 0.5191 = 0.1083$$

$$0.6274 - 0.6913 = -0.0639$$

$$0.6274 - 0.7792 = -0.1518$$

$$0.6274 - 0.6194 = 0.008$$

În concluzie, studiind tabelele 2b, 3b, 4b, 5b, 6b și 7b se observă că ordinea finală de influență a factorilor asupra procesului studiat, atât la lagăre din safir cât și la cele de rubin este: numărul de impulsuri aplicate, deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fascicolului laser, tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj și capacitatea sistemului de pompaj.

Variabilele de stare X, Y și Z și în cazul lagărelor de safir și a lagărelor de rubin, sunt dependente de acești patru parametri care au diferite nivele. Se pune problema stabilirii valorilor optime ale acestor parametri astfel încât alezajul să fie circular, adausul de prelucrare să fie minim, iar eficiența economică de prelucrare să fie maximă. În prima etapă se urmărește obținerea unui model matematic liniar, adecvat procesului care să permită înaintarea către zona optimului.

În acest scop pe baza datelor experimentale avute, tabel 1, se realizează un program factorial complet de tipul 2^4 . Acest experiment factorial complet de tipul 2^4 , a fost realizat, atât pentru funcția de răspuns X cât și pentru funcția de răspuns Y și de asemenea pentru funcția de răspuns Z, atât pentru microalezajele prelucrate în lagărele de safir cât și de rubin.

În cazul experimentului factorial intervalul de variație se alege pe baza informației apriorice sau a intuiției. Alegerea corespunzătoare a intervalului de variație a factorilor garantează obținerea modelului matematic adecvat al procesului.

Pe baza informațiilor experimentale și a considerațiilor teoretice s-a propus ca centrul experimentului să fie plasat în punctul de coordonate : A=750 μ F ; B=1450V ; C=3 impulsuri și D=0.

Codificarea factorilor, exprimă trecerea de la un sistem de coordonate în unități de măsură naturale, la un alt sistem în cadrul căruia fiecare punct din spațiul factorial ce reprezintă condițiile codificate de realizare a experimentului au coordonatele : (± 1 , ± 1).

În mod concret trecând la experimentul studiat s-au făcut următoarele codificări:

- pentru parametrul A : 500 μ F(-1) ; 1000 μ F(+1)
- pentru parametrul B : 1400V(-1) ; 1500V(+1)
- pentru parametrul C : 2 impulsuri (-1) ; 4 impulsuri(+1)
- pentru parametrul D : -0.6 mm(-1) ; +0.6 mm(+1)

Pentru a realiza matricea program a experimentului factorial complet atât pentru lagăre de safir cât și pentru lagărele de rubin din tabelul 1 extragem următoarele rînduri:

Tabel 8

A	B	C	D
2	3	4	2
1	3	4	2
2	2	4	2
1	2	4	2
2	3	2	2
1	3	2	2
2	2	2	2
1	2	2	2
2	3	4	4
1	3	4	4
2	2	4	4
1	2	4	4
2	3	2	4
1	3	2	4
2	2	2	4
1	2	2	4

Trecând la codificarea +1; -1 se concepe matricea program în cazul funcției de răspuns X, pentru microalezaje prelucrate în lagăre plane de safir, pe baza tabelului 8, cu date extrase din tabelul 1. Se concepe astfel tabelul 9.

Pentru funcțiile de răspuns Y și Z în cazul lagărelor de safir, în mod similar se concep tabelele 10 și 11.

Pentru microalezaje prelucrate în lagărele de rubin, în cazul funcțiilor de răspuns X, Y, Z asemenea se concep matricele program oglindite în tabelele 12, 13 și 14.

Deci în tabelul 9 este evidențiată matricea program în cazul funcției de răspuns X, pentru microalezaje prelucrate în lagărele plane de safir. X_0 este o constantă care are invariabil valoarea +1. S-au notat cu $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}$ valorile funcției de răspuns X, pentru cele patru încercări diferite, iar \bar{y}_i este media aritmetică.

În urma calculelor specifice experimentului factorial se stabilesc valorile coeficienților de regresie.

$$b_0 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_{0i} \bar{y}_i = 0.252125 \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_{1i} \bar{y}_i = 0.070 \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_{2i} \bar{y}_i = 0.034875 \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_{3i} \bar{y}_i = 0.05637 \quad (4)$$

$$b_4 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_{4i} \bar{y}_i = 0.008625 \quad (5)$$

Cunoscând coeficienții de regresie, ecuația de regresie are forma:

$$\bar{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (6)$$

Rezultatele calculului sunt centralizate în coloanele matricei program, tabelul 9.

Pentru estimarea erorii experimentale se calculează dispersiile pe fiecare rând al matricei cu relația următoare:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_{iq} - \bar{y}_i)^2 \quad (i=1,16) \quad n=4 \quad (7)$$

În mod concret, pentru primul rând al matricei program, dispersia se calculează cu formula (7') :

$$S_1^2 = \frac{1}{3} \left[(y_{11} - \bar{y}_1)^2 + (y_{12} - \bar{y}_1)^2 + (y_{13} - \bar{y}_1)^2 + (y_{14} - \bar{y}_1)^2 \right] = 9.84 \cdot 10^{-4}$$

(7')

În mod similar se calculează și celelalte dispersii, rezultatele calculului fiind trecute în coloanele tabelului 9.

Omogenitatea dispersiilor se verifică cu criteriul' Cochran:

$$G_{calc} = \frac{\max S_i^2}{\sum_{i=1}^{16} S_i^2} = 0.195 \quad (8)$$

$$\zeta_{TAB, \alpha, f_1, f_2} = 0.318$$

$$\alpha=0.95, f_1=n-1=3, f_2=N=16$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB, 0.95, 3, 16} \quad (9)$$

Deoarece inegalitatea (9) este respectată se consideră dispersiile omogene.

În continuare se calculează dispersia reproductibilității:

Tabel 9

SAFIR variabila X

Calculare

Factori

Variabile de stare

Nr. det.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	\bar{y}_i	$S^2_i \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$
1	+1	+1	+1	+1	+1	0.406	0.426	0.408	0.424	0.416	9.84	0.422	0.36
2	+1	-1	+1	+1	+1	0.308	0.31	0.303	0.272	0.296	23.82	0.282	1.96
3	+1	+1	-1	+1	+1	0.362	0.358	0.401	0.423	0.386	88.63	0.3522	11.42
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.161	0.168	0.198	0.217	0.186	61.63	0.2122	6.86
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.310	0.305	0.299	0.258	0.293	50.83	0.3092	2.62
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.161	0.157	0.155	0.195	0.167	31.92	0.1692	0.05
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.246	0.237	0.239	0.238	0.240	1.5	0.2395	0
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.100	0.098	0.104	0.106	0.102	1.2	0.0995	0.06
9	+1	+1	+1	+1	-1	0.408	0.412	0.385	0.375	0.395	28.74	0.4047	0.94
10	+1	-1	+1	+1	-1	0.298	0.296	0.265	0.269	0.282	27.3	0.2647	2.99
11	+1	+1	-1	+1	-1	0.322	0.328	0.366	0.356	0.343	40.92	0.3349	0.66
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.153	0.155	0.176	0.172	0.164	12.3	0.1949	9.55
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.298	0.305	0.272	0.269	0.286	29.7	0.292	0.36
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.148	0.144	0.173	0.179	0.161	27.78	0.152	0.81
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.208	0.211	0.225	0.232	0.219	11.7	0.2222	0.1
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.090	0.093	0.102	0.107	0.098	5.58	0.0822	2.5

$$S_0^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (10)$$

$$S_0^2 = 9.4456 \cdot 10^{-4}$$

și apoi se calculează dispersia coeficienților ecuației de regresie cu relația:

$$S_{b_j}^2 = \frac{S_0^2}{N'}$$

$$N' = N \cdot n \quad (11)$$

$$S_{b_j}^2 = \frac{9.4456 \cdot 10^{-4}}{16 \cdot 4} = 0.147588 \cdot 10^{-4}$$

Se stabilește intervalul de încredere pentru coeficienții de regresie b_j cu relația:

$$I(b_j) = \pm t_{TAB, \alpha, 3, 16} \cdot S_{b_j} \quad (12)$$

Coeficientul $t_{TAB, \alpha, 3, 16}$ se extrage din tabelele pentru repartiția Student;

$$t_{TAB, \alpha, 3, 16} = 2.12$$

$$I(b_j) = \pm 2.12 \cdot 0.003842 = \pm 0.008144$$

Conform condiției: $|b_j| > |I(b_j)| \quad (13)$

toți coeficienții de regresie sunt semnificativi.

Pentru verificarea concordanței ecuației de regresie se calculează dispersia de concordanță cu relația:

$$S_{adecv}^2 = \frac{n}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (14)$$

pe baza rezultatelor din ultima coloană a tabelului 9.

l = numărul de termeni semnificativi, din ecuația de regresie $l = 5$.

$$S_{adecv}^2 = \frac{4}{16-5} \cdot 41.24 \cdot 10^{-4} = 14.996 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{CALC} = \frac{S_{adecv}^2}{S_0^2} = \frac{14.996 \cdot 10^{-4}}{9.4456 \cdot 10^{-4}} \quad (15), (16)$$

$$F_{CALC} < \mathfrak{F}_{TAB, \alpha, f_1, f_2}$$

Concordanța ecuației se verifică cu relațiile (15) și (16). Dacă inecuația (16) este satisfăcută, ecuația liniară de regresie este adecvată datelor experimentale.

$\mathfrak{F}_{TAB, \alpha, f_1, f_2}$ se extrage din tabelele corespunzătoare criteriului Fischer.

$$f_1 = N - l = 16 - 5 = 11$$

$$f_2 = N(n - 1) = 16 \cdot 3 = 48$$

$$\mathfrak{S}_{TAB, 0.95, 11, 48} = 2.02$$

$$F_{CALC} < \mathfrak{F}_{TAB}$$

După cum se observă, ultima inegalitate este satisfăcută, deci, în concluzie: toți coeficienții ecuației de regresie sunt semnificativi, ecuația liniară de regresie este adecvată datelor experimentale și fapt esențial, modelul poate fi utilizat pentru rezolvarea în continuare a problemei de optimizare.

Raționamentul este identic și pentru lagărele de rubin, variabilele X.

Matricea program a experimentului este redată în tabelul 10.

În urma calculelor valorile coeficienților de regresie sunt:

$$b_0 = 0.230938$$

$$b_1 = 0.066563$$

$$b_2 = 0.030563$$

$$b_3 = 0.040063$$

$$b_4 = 0.007688$$

Dispersiile sunt omogene, deoarece inegalitatea (9) este respectată.

$$G_{calc} = 0.1621$$

$$\zeta_{TAB, 0.95, 3, 16} = 0.318 \quad (8), (9)$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB}$$

De asemenea este respectată inegalitatea (13); deci toți coeficienții de regresie sunt semnificativi:

$$S_0^2 = 5.126875 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{b_j}^2 = 0.080107 \cdot 10^{-4}$$

$$I(b_j) = 0.006$$

$$|b_j| > |I(b_j)| \quad (10)...(16)$$

$$S_{adecv}^2 = 5.272727 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{calc} = 1.028449$$

$$\mathfrak{S}_{TAB, \alpha, f_1, f_2} = 2.02$$

$$F_{calc} < \mathfrak{F}_{TAB, \alpha, f_1, f_2}$$

Inecuația (16) este satisfăcută, deci ecuația liniară de regresie este adecvată datelor experimentale.

Metoda experimentului factorial a fost aplicată și în cazul variabilei Y. Pentru microalezajele prelucrate în lagărele plane de safir, matricea program a experimentului, în cazul variabilei Y este redată în tabelul 11.

În acest caz, variabilele coeficienților ecuației de regresie sunt:

Tabel 10

RUBIN variabila X

Calculare

Variabile de stare

Factori

Nr. det.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	\bar{y}_i	$S^2_i \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$
1	+1	+1	+1	+1	+1	0.371	0.378	0.396	0.407	0.388	24.42	0.3758	1.48
2	+1	-1	+1	+1	+1	0.232	0.237	0.258	0.253	0.245	13.98	0.2426	0
3	+1	+1	-1	+1	+1	0.312	0.319	0.335	0.338	0.326	14.10	0.3146	1.28
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.166	0.169	0.170	0.167	0.168	0.300	0.1815	1.84
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.272	0.275	0.291	0.318	0.289	39.90	0.2956	0.45
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.160	0.166	0.172	0.158	0.164	3.600	0.1625	0
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.232	0.239	0.233	0.204	0.227	22.02	0.2345	0.57
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.106	0.104	0.096	0.102	0.102	1.68	0.1044	0
9	+1	+1	+1	+1	-1	0.360	0.365	0.372	0.363	0.365	1.71	0.3604	0.21
10	+1	-1	+1	+1	-1	0.210	0.208	0.231	0.211	0.215	10.38	0.2273	1.52
11	+1	+1	-1	+1	-1	0.300	0.292	0.308	0.308	0.302	5.28	0.2993	0
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.150	0.145	0.164	0.177	0.159	18.78	0.1661	0.52
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.255	0.259	0.288	0.286	0.272	27.3	0.2803	0.69
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.145	0.149	0.160	0.162	0.154	6.18	0.1471	0.46
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.198	0.189	0.228	0.229	0.211	37.98	0.2191	0.67
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.100	0.092	0.118	0.122	0.108	18.48	0.0860	4.81

Tabel 11

SAFIR variabila Y

Nr. det.	Factori					Variabile de stare					Calculule		
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	\bar{y}_i	$S^2_i \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$
1	+1	+1	+1	+1	+1	0.342	0.349	0.332	0.369	0.348	22.02	0.3407	0.053
2	+1	-1	+1	+1	+1	0.192	0.195	0.236	0.217	0.210	38.22	0.193	2.89
3	+1	+1	-1	+1	+1	0.283	0.288	0.319	0.322	0.303	37.26	0.2892	1.89
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.092	0.096	0.135	0.125	0.122	40.62	0.1415	8.70
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.286	0.290	0.275	0.273	0.281	6.18	0.2825	0.02
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.111	0.109	0.132	0.140	0.123	21.30	0.1347	1.37
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.213	0.219	0.222	0.238	0.223	10.26	0.231	0.64
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.083	0.088	0.110	0.163	0.096	14.34	0.0832	1.63
9	+1	+1	+1	+1	-1	0.288	0.291	0.295	0.326	0.300	27.78	0.3247	6.13
10	+1	-1	+1	+1	-1	0.188	0.189	0.191	0.168	0.184	10.38	0.177	0.49
11	+1	+1	-1	+1	-1	0.271	0.277	0.310	0.334	0.298	78.31	0.2732	6.13
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.092	0.098	0.132	0.118	0.110	30.48	0.1255	2.4
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.260	0.262	0.270	0.280	0.268	7.44	0.2655	0.02
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.122	0.119	0.115	0.140	0.124	10.96	0.1187	0.28
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.200	0.208	0.210	0.19	0.202	7.44	0.215	1.69
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.09	0.087	0.092	0.059	0.082	21.54	0.0675	2.18

$$b_0 = 0.204$$

$$b_1 = 0.073875$$

$$b_2 = 0.02575$$

$$b_3 = 0.029125$$

$$b_4 = 0.008$$

Ca în cazul variabilei X, inegalitățile (9), (13) și (16) sunt respectate.

$$G_{calc} = 0.2036$$

$$\zeta_{TAB,0.95,3,16} = 0.318$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB}$$

$$S_0^2 = 8.011 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{b_j}^2 = 0.125173 \cdot 10^{-4}$$

$$I(b_j) = 0.007501 \quad (8)...(16)$$

$$|b_j| > |I(b_j)|$$

$$S_{adecv}^2 = 13.27745 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{calc} = 1.6574$$

$$\mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2} = 2.02$$

$$F_{calc} < \mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2}$$

În cazul lagărelor plane de rubin, variabila Y, matricea program a experimentului este expusă în tabelul 12.

Se stabilesc următoarele valori pentru coeficienții de regresie:

$$b_0 = 0.208563$$

$$b_1 = 0.066688$$

$$b_2 = 0.029188$$

$$b_3 = 0.040063$$

$$b_4 = 0.008438$$

În urma calculelor se stabilește că inegalitățile (9), (13) și (16) sunt respectate:

Tabel 12

RUBIN variabeli Y

Factori

Variabile de stare

Calculi

Nr. det.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	\bar{y}_i	$S^2_i \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$
1	+1	+1	+1	+1	+1	0.350	0.373	0.353	0.372	0.362	13.38	0.3529	0.82
2	+1	-1	+1	+1	+1	0.247	0.249	0.231	0.213	0.235	25.2	0.2195	2.38
3	+1	+1	-1	+1	+1	0.296	0.312	0.316	0.292	0.304	12.48	0.2945	0.89
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.126	0.128	0.146	0.152	0.138	15.12	0.1611	5.38
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.252	0.257	0.269	0.290	0.267	25.74	0.2728	0.34
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.121	0.129	0.142	0.140	0.133	8.7	0.1394	0.41
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.196	0.194	0.211	0.211	0.203	7.74	0.2144	1.31
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.088	0.086	0.098	0.104	0.094	6.48	0.081	1.67
9	+1	+1	+1	+1	-1	0.321	0.328	0.366	0.365	0.345	51.19	0.336	0.8
10	+1	-1	+1	+1	-1	0.172	0.176	0.215	0.225	0.197	65.23	0.2026	0.32
11	+1	+1	-1	+1	-1	0.271	0.277	0.298	0.298	0.286	17.82	0.2776	0.69
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.102	0.98	0.139	0.149	0.122	59.83	0.1611	15.36
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.230	0.229	0.245	0.252	0.239	11.58	0.2559	2.87
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.104	0.098	0.143	0.151	0.124	64.99	0.1225	0
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.190	0.199	0.189	0.206	0.196	5.82	0.1975	0
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.089	0.09	0.103	0.086	0.092	5.1	0.064	7.74

$$G_{calc} = 0.164556$$

$$\zeta_{TAB,0.95,3,16} = 0.318$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB}$$

$$S_0^2 = 8.258333 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{b_j}^2 = 0.129036 \cdot 10^{-4}$$

$$I(b_j) = 0.007615$$

$$|b_j| > |I(b_j)|$$

$$S_{adecv}^2 = 14.901818 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{calc} = 1.804458$$

$$\mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2} = 2.02 \quad (8)...(16)$$

$$F_{calc} < \mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2}$$

În concluzie, în urma investigațiilor făcute pe baza metodei factoriale, atât dimensiunea maximă a microalezajelor (variabila X) cât și dimensiunea minimă a aceluiași microalezaje (variabila Y) se pretează în continuare pentru rezolvarea problemei de optimizare.

Se pune problema dacă și pentru variabila Z, adâncimea microalezajelor, matricea program a experimentului factorial este adecvată pentru aplicarea ulterioară a unei metode de optimizare.

În tabelul 13 este redată matricea program a variabilei Z, în cazul microalezajelor prelucrate în lagăre plane de safir.

Valorile coeficienților ecuației de regresie obținute în urma calculelor sunt:

$$b_0 = 0.867125$$

$$b_1 = 0.220125$$

$$b_2 = 0.117875$$

$$b_3 = 0.282875$$

$$b_4 = -0.035875$$

În urma calculelor se stabilește că și pentru variabila Z inecuațiile (9), (13) și sunt respectate.

Tabel 13

SAFIR variabila Z

Nr. det.	Factori					Variabile de stare					Calcule		
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	y_i	$S_i \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$
1	+1	+1	+1	+1	+1	1.466	1.460	1.503	1.499	1.482	44.1	1.4521	8.93
2	+1	-1	+1	+1	+1	0.933	0.982	0.972	0.979	0.953	61.87	1.0118	34.66
3	+1	+1	-1	+1	+1	1.185	1.181	1.225	1.237	1.207	71.53	1.2163	0.88
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.728	0.732	0.781	0.811	0.763	114.43	0.7661	1.72
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.832	0.836	0.888	0.868	0.856	64.33	0.8863	9.23
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.455	0.459	0.509	0.509	0.483	81.37	0.4461	13.16
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.641	0.648	0.646	0.701	0.659	71.35	0.6506	0.7
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.222	0.275	0.229	0.262	0.247	58.75	0.2103	13.41
9	+1	+1	+1	+1	-1	1.518	1.552	1.514	1.556	1.535	43.8	1.5238	1.24
10	+1	-1	+1	+1	-1	1.085	1.079	1.12	1.124	1.102	48.78	1.0836	3.38
11	+1	+1	-1	+1	-1	1.339	1.337	1.229	1.301	1.319	43.44	1.2881	9.53
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.82	0.862	0.815	0.859	0.839	55.99	0.8478	0.79
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.939	0.931	0.981	0.985	0.959	70.33	0.9581	0
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.488	0.496	0.535	0.521	0.510	57.31	0.5178	0.62
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.666	0.659	0.703	0.696	0.681	42.54	0.7223	17.12
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.327	0.259	0.261	0.269	0.279	93.85	0.2821	0.1

$$G_{calc} = 0.111773$$

$$\zeta_{TAB,0.95,3,16} = 0.318$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB,0.95,3,16}$$

$$S_0^2 = 21.328542 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{b_j}^2 = 0.333258 \cdot 10^{-4}$$

$$I(b_j) = 0.012238 \quad (8)...(16)$$

$$|b_j| > |I(b_j)|$$

$$S_{adcv}^2 = 41.96 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{calc} = 1.967317$$

$$\mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2} = 2.02$$

$$F_{calc} < \mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2}$$

În tabelul 14 este expusă matricea program a variabilei Z, în cazul microalezajelor în lagărele plane de rubin.

În acest caz, valorile coeficienților de regresie calculate sunt.

$$b_0 = 0.87475$$

$$b_1 = 0.219375$$

$$b_2 = 0.10825$$

$$b_3 = 0.279875$$

$$b_4 = -0.033356$$

Și în cazul microalezajelor prelucrate în lagăre de rubin pentru variabila Z, se respectă inegalitățile (9), (13) și (16).

Tabel 14

RUBIN variabila Z

Nr. det.	Factori								Variabile de stare				Calcule	
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	y_{i4}	\bar{y}_i	$S^2 \cdot 10^4$	\bar{y}_i	$(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \cdot 10^4$	
1	+1	+1	+1	+1	+1	1.446	1.439	1.486	1.481	1.463	51.55	1.4488	1.99	
2	+1	-1	+1	+1	+1	1.016	0.976	1.006	0.975	0.994	41.82	1.0101	2.61	
3	+1	+1	-1	+1	+1	1.202	1.119	1.235	1.235	1.217	39.42	1.2323	2.37	
4	+1	-1	-1	+1	+1	0.779	0.816	0.812	0.785	0.798	31.5	0.7936	0.19	
5	+1	+1	+1	-1	+1	0.825	0.865	0.829	0.869	0.847	48.48	0.8891	17.76	
6	+1	-1	+1	-1	+1	0.486	0.440	0.476	0.442	0.461	49.56	0.4503	1.12	
7	+1	+1	-1	-1	+1	0.677	0.712	0.672	0.723	0.696	57.67	0.6726	5.46	
8	+1	-1	-1	-1	+1	0.272	0.232	0.276	0.240	0.255	44.52	0.2338	4.45	
9	+1	+1	+1	+1	-1	1.506	1.546	1.509	1.531	1.523	32.34	1.5156	0.55	
10	+1	-1	+1	+1	-1	1.079	1.045	1.081	1.035	1.06	49.56	1.0768	2.84	
11	+1	+1	-1	+1	-1	1.302	1.342	1.299	1.333	1.319	42.42	1.2991	3.96	
12	+1	-1	-1	+1	-1	0.844	0.876	0.839	0.893	0.863	60.19	0.8605	0	
13	+1	+1	+1	-1	-1	0.968	1.009	0.971	1.000	0.987	38.1	0.9558	9.7	
14	+1	-1	+1	-1	-1	0.546	0.512	0.543	0.515	0.529	29.1	0.5171	1.41	
15	+1	+1	-1	-1	-1	0.721	0.685	0.719	0.679	0.701	43.92	0.7393	14.71	
16	+1	-1	-1	-1	-1	0.266	0.301	0.261	0.304	0.283	46.14	0.3006	3.1	

$$G_{calc} = 0.08522$$

$$\zeta_{TAB,0.95,3,16} = 0.318$$

$$G_{calc} < \zeta_{TAB,0.95,3,16}$$

$$S_0^2 = 14.714375 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{b_j}^2 = 0.229912 \cdot 10^{-4}$$

$$I(b_j) = 0.010165 \quad (8)...(16)$$

$$|b_j| > |I(b_j)|$$

$$S_{adecv}^2 = 6.565455 \cdot 10^{-4}$$

$$F_{calc} = 0.446193$$

$$\mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2} = 2.02$$

$$F_{calc} < \mathfrak{F}_{TAB,\alpha,f_1,f_2}$$

În concluzie și pentru variabila Z atât în cazul lagărelor plane de rubin cât și a celor de safir toți coeficienții ecuației de regresie sunt semnificativi, ecuația liniară de regresie este adecvată datelor experimentale și element major, modelul poate fi utilizat pentru rezolvarea în continuare a problemei de optimizare.

Se observă că suprafețele de răspuns prezentate sunt practic în toate cazurile plane, ceea ce datorită faptului că modelele regresionale găsite au fost verificate experimental cu bună aproximare, arată că termenii de ordin superior sunt mici, asemenea și interacțiunile dintre factori.

Din acest motiv, pentru identificarea unor domenii de optim, definite pentru o anumită funcție obiectiv, este necesară deplasarea către aceste zone prin metoda gradientului.

Metoda gradientului sau metoda deplasării după direcția de pantă maximă este cea mai adecvată experimentului analizat anterior.

După determinarea modelului și verificarea adecvantei sale, se inițiază deplasarea de la nivelul de bază (punctul central al experimentului), către optim. Pentru aceasta, se atribuie valorilor factorilor corespunzători punctului central creșteri proporționale cu valorile coeficienților de regresie corespunzatori.

După cum s-a arătat centrul experimentului a fost plasat în coordonatele: $A=750 \mu\text{F}$, $B=1450 \text{ V}$, $C=3$ impulsuri și $D=0$.

Intervalul de variație reprezintă acea valoare care adăugată sau scăzută la nivelul de bază, determină nivelul superior, respectiv inferior, conform tabelului 15.

Tabelul 15.

	A(μF)	B(V)	C(impulsuri)	D(mm)
Nivel de bază	750	1450	3	0
Interval de variație	250	50	1	0.6
Nivel superior	1000	1500	4	0.6
Nivel inferior	500	1400	2	-0.6

După cum s-a arătat anterior când s-a constituit programul factorial complet de tip 2^4 , parametrul A are nivelul superior $1000 \mu\text{F}$ și nivelul inferior $500 \mu\text{F}$, parametrul B are nivelul superior 1500 V , iar nivelul inferior 1400 V , iar parametrul C are nivelul superior 4 impulsuri, iar nivelul inferior 2 impulsuri și parametrul D are nivelul superior $+0.6 \text{ mm}$ și nivelul inferior -0.6 mm , date cu care a fost conceput tabelul 15.

Studiind spectrul larg al datelor experimentale din tabelul 1, se observă că pentru valorile parametrilor B, C și D există o mare varietate de alegeri. S-au ales valorile din tabelul 15 pentru că la aceste valori randamentul prelucrării microalezajului este optim și pentru că rebuturile obținute sunt minime. La tensiuni mai mari, $B=1600 \text{ V}$, lagărele plane din safire și rubine se sparg cu ușurință în timpul prelucrării microalezajelor.

În continuare se calculează pasul p al experimentului cu formula:

$$p = b_j \cdot I_j \cdot \lambda \quad j=1\dots k \quad (17)$$

$$0 < \lambda < 1 \text{ s-a ales } \lambda = 0.9$$

Conform formulei (17) valorile pasului p pentru lagăre plane de safir, variabile X, sunt:

$$\begin{matrix} b_j & I_j & \lambda & p \\ \begin{bmatrix} b_1 = 0.070000 \\ b_2 = 0.034875 \\ b_3 = 0.056370 \\ b_4 = 0.008625 \end{bmatrix} & \cdot \begin{bmatrix} 250 \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{bmatrix} & \cdot 0.9 = & \begin{bmatrix} 15.75000 \\ 1.575000 \\ 0.050700 \\ 0.003105 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

În funcție de posibilitățile de reglare a instalației laser, pasul se rotunjește la valorile din tabelul 16.

Tabelul 16 .

	A(μF)	B(V)	C	D(mm)
Pasul rotunjit	25	5	0	0.1

Pornind din punctul central al experimentului se începe un nou experiment prin adăugarea succesivă a valorilor pașilor la valorile inițiale. Pe parcursul deplasării după fiecare pas se verifică valorile funcției de răspuns, vezi tabelul 17.

Se calculează tot cu formula (17) valorile pasului p pentru lagăre plane de rubin, variabila X .

$$\begin{matrix} b_j & I_j & \lambda & p \\ \left[\begin{matrix} b_1 = 0.066563 \\ b_2 = 0.030563 \\ b_3 = 0.040063 \\ b_4 = 0.007688 \end{matrix} \right] & \cdot \left[\begin{matrix} 250 \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{matrix} \right] & \cdot 0.9 = & \left[\begin{matrix} 14.9700 \\ 1.37500 \\ 0.03600 \\ 0.00276 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

Și în acest caz pasul se rotunjește la valorile din tabelul 16.

Deoarece variabilele X și Y reprezintă dimensiunile maxime și respectiv minime ale deschiderii microalezajelor prelucrate cu fascicul laser, și pentru variabila Y sunt valabili aceeași pași, situație confirmată și de calcule.

În cazul lagărelor plane de safir, variabila Y , aplicând formula (17) se obțin următoarele valori pentru pasul p :

$$\begin{matrix} b_j & I_j & \lambda & p \\ \left[\begin{matrix} b_1 = 0.073875 \\ b_2 = 0.025750 \\ b_3 = 0.029100 \\ b_4 = 0.008000 \end{matrix} \right] & \cdot \left[\begin{matrix} 250 \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{matrix} \right] & \cdot 0.9 = & \left[\begin{matrix} 20.52000 \\ 1.430000 \\ 0.032000 \\ 0.003556 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

Valorile pasului în cazul variabilei Y , pentru lagărele de rubin sunt:

$$\begin{matrix} b_j & I_j & \lambda & p \\ \left[\begin{matrix} b_1 = 0.066688 \\ b_2 = 0.029188 \\ b_3 = 0.040063 \\ b_4 = 0.008430 \end{matrix} \right] & \cdot \left[\begin{matrix} 250 \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{matrix} \right] & \cdot 0.9 = & \left[\begin{matrix} 15.00400 \\ 1.313400 \\ 0.036000 \\ 0.003038 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

După cum se observă, aceste valori ale pasului p se adaptează perfect la valorile rotunjite ale pasului din tabelul 16.

În tabelul 17 este redat noul experiment cu valorile factorilor A , B , C și D stabilite pe baza pasului rotunjit calculat anterior.

Studiind tabelul 17 se observă că pentru lagărele de safir apare un maxim pentru valorile parametrilor fasciculului laser $A=950 \mu F$, $B=1490 V$, $C=3$ impulsuri

iar $D=0.8$ mm. De asemenea în punctul de optim valoarea raportului X/Y este cât mai apropiată de unitate, indiciu că pentru acești parametri ai fascicolului laser, alezajul obținut se apropie cel mai mult de forma cilindrică.

În cazul lagărelor de rubin tabelul 17 ne arată că maximul apare pentru următoarele valori ale parametrilor fascicolului laser: $A=925 \mu\text{F}$, $B=1485$ V, $C=3$ impulsuri și $D=0.7$ mm. Și în acest caz valoarea raportului X/Y în punctul de optim este cea mai apropiată de unitate dovadă că acest alezaj este cel mai apropiat de forma cilindrică

Tabelul 17
Valorile parametrilor fascicolului laser Valorile funcției de răspuns

A(μF)	B(V)	C(imp)	D(mm)	Safir		X / Y		Rubin		X / Y	
				X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
775	1455	3	0.1	0.321	0.285	1.126	0.311	0.282	1.143		
800	1460	3	0.2	0.326	0.299	1.090	0.319	0.281	1.135		
825	1460	3	0.3	0.328	0.302	1.086	0.325	0.292	1.113		
850	1470	3	0.4	0.352	0.328	1.073	0.333	0.301	1.107		
875	1475	3	0.5	0.389	0.365	1.065	0.387	0.352	1.098		
900	1480	3	0.6	0.400	0.380	1.052	0.399	0.366	1.090		
925	1485	3	0.7	0.419	0.399	1.050	0.402	0.383	1.049		
950	1490	3	0.8	0.421	0.402	1.047	0.391	0.371	1.0539		
975	1495	3	0.9	0.398	0.378	1.0529	0.388	0.367	1.057		

Cu formula (17) se calculează în continuare valorile pasului p în cazul variabilei Z , pentru lagăre plane din safir:

$$\begin{bmatrix} b_1 = 0.220125 \\ b_2 = 0.117875 \\ b_3 = 0.282875 \\ b_4 = -0.03587 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_j \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{bmatrix} \cdot 0.9 = \begin{bmatrix} 49.528125 \\ 5.3000000 \\ 0.2828750 \\ 0.0129150 \end{bmatrix}$$

Valorile pasului rotunjit sunt trecute în tabelul 18.
Tabelul 18.

	A(μF)	B(V)	C	D(mm)
Pasul rotunjit	50	10	0	0.2

Se execută un nou experiment cu aceste valori ale pasului rotunjit adăugate la valorile nivelului de bază.

Datele acestui nou experiment sunt redată în tabelul 19. Și în acest caz se aplică formula (17).

$$\begin{matrix}
 b_j & I_j & \lambda & p \\
 \begin{bmatrix} b_1 = 0.219375 \\ b_2 = 0.108250 \\ b_3 = 0.279875 \\ b_4 = -0.03335 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 250 \\ 50 \\ 1 \\ 0.6 \end{bmatrix} & \bullet & 0.9 = \begin{bmatrix} 49.35930 \\ 4.871250 \\ 0.251888 \\ 0.014825 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

Și în cazul lagărelor de rubin se execută un nou experiment, iar valorile experimentului sunt redată tot în tabelul 19.

Tabelul 19.

Valorile parametrilor fascicolului laser				Valorile funcției de răspuns	
A(μF)	B(V)	C(imp)	D(mm)	Z-safir	Z-rubin
800	1460	3	0.2	0.807	0.812
850	1470	3	0.4	0.937	0.965
900	1480	3	0.6	1.332	1.102
950	1490	3	0.8	1.321	1.325
1000	1500	3	1	1.309	1.312
1050	1010	3	1.2	1.298	1.308

Studiind tabelul 19 se observă că în punctul de optim valorile fascicolului laser în cazul lagărelor de safir sunt : A=900 μF, B=1480 V, C=3 impulsuri și D=0.6 mm. În cazul lagărelor de rubin, în punctul de optim, valorile fascicolului laser sunt:

A=950 μF, B=1490 V, C=3 impulsuri și D=0.8 mm.

Datorită faptului că în punctul de optim corespunzător dimensiunilor maxime și minime ale alezajului, există o ușoară variație a parametrilor fascicolului laser față de parametrii fascicolului laser corespunzător adâncimii alezajului, se aleg atât pentru lagărele de safir cât și de rubin următoarele valori: A=1000 μF, B=1500 V, C=3 impulsuri, iar D o treime din înălțimea lagărului, valori care se pot regla cu ușurință la instalațiile laser folosite.

După cum se observă studiind acest experiment practic metoda bilanțului aleator, metoda experimentului factorial complet de tipul 2^4 și metoda gradientului, ca metodă de optimizare formează un tot unitar. Ele se adaptează perfect studiului prelucrării microalezajelor în lagărele plane de rubin sau safir.

Concluziile generale care se desprind în finalul acestei analize statistice laborioase sunt:

- în toate situațiile analizate, atât pentru lagărele de safir cât și pentru lagărele de rubin ordinea importanței parametrilor fascicolului laser este următoarea: numărul de impulsuri aplicate este cel mai important parametru, după care urmează în ordine descrescătoare a importanței: deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fascicolului laser, tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj și în final capacitatea sistemului de pompaj. Această ordine se păstrează

aceeași atât în cazul diametrului maxim sau diametrului minim al microalezajului cât și în cazul adâncimii microalezajului.

- deoarece numărul de impulsuri aplicate este cel mai important parametru al fascicolului laser, el are o influență decisivă asupra dimensiunilor alezajelor obținute și în cazul experimentului corespunzător metodei gradientului s-a păstrat constant, 3, vezi tabelele 16 și 18. Dacă s-ar fi variat numărul de impulsuri, experimentul nu ar fi reușit. Modificându-se numărul de impulsuri, dimensiunile microalezajului cresc, iar ceilalți parametri ai fascicolului laser care au o variație minoră, vezi tabelele 17 și 19, nu reușesc să influențeze considerabil dimensiunile microalezajului.

- următorul parametru al fascicolului laser în ordinea importanței este poziția planului de focalizare față de suprafața piesei. Acest factor are o subtilă influență asupra cavității obținute în urma prelucrării cu fascicol laser. Metoda gradientului ne indică un optim, când planul focal se află la 0.6 mm în interiorul piesei, vezi tabelul 19. Cum lagărul analizat are înălțimea de 1.8 mm, 0.6 mm reprezintă o treime din înălțimea lagărului. Aplicând metoda gradientului și la variabilele de răspuns X și Y, atât pentru microalezajele prelucrate în lagărele de safir, cât și pentru cele prelucrate în lagăre de rubin, se observă că optimul în acest caz nu apare când focarul este poziționat la distanța de +0.6 mm față de suprafața piesei, ci la o distanță puțin modificată de +0.7 mm și +0.8 mm, valori care reprezintă aproximativ o treime din înălțimea piesei, vezi tabelul 17. De asemenea, studiind valorile rapoartelor X/Y în cazul lagărelor de safir sau rubin, vezi tabelul 17, se observă că în zona de optim, valorile se apropie cel mai mult de unitate. Deci în zona de optim, considerată când focarul fascicolului laser este situat la o treime din înălțimea lagărului, microalezajul are forma cea mai apropiată de forma cilindrică.

- următorii parametri ai fascicolului laser în ordinea importanței sunt: tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj și capacitatea sistemului de pompaj. Când s-a realizat practic experimentul din tabelul 1, s-a observat că la valori mari ale acestor parametri, $A=1000 \mu F$ și $B=1600 V$, dacă se aplică un număr de 3 impulsuri și 4 impulsuri, multe lagăre se sparg în timpul procesului de prelucrare tehnologică și apar multe rebuturi, de aceea aceste valori extreme se evită.

- în urma studiului efectuat pe baza metodei de optimizare și din cauza dificultăților de reglare cu precizie a parametrilor fascicolului laser (la instalația laser utilizată la acest experiment), ca valori optime pentru acești parametri se aleg: $A=1000 \mu F$, $B=1500 V$, $C=3$ impulsuri, iar D o treime din înălțimea lagărului, valori cu care se obțin microalezaje cât mai apropiate de forma cilindrică, iar randamentul de prelucrare este maxim.

Reprezentarea suprafețelor de răspuns pentru funcțiile X, Y și Z se obține utilizând programul STAT GRAPHICS.

Programul STAT GRAPHICS este un program de calculator și are ca bază de pornire metoda experimentului factorial. Datele de intrare pentru aplicarea programului STAT GRAPHICS se extrag din tabelele 9, 10, 11, 12, 13, 14, respectiv coloanele Y_{i_1} , Y_{i_2} , Y_{i_3} , Y_{i_4} , \bar{Y}_i , care reprezintă cele patru încercări paralele care s-au

făcut pentru diverse valori alese ale parametrilor instalației laser, atât în cazul lagărelor de safir cât și de rubin.

Studiind reprezentarea suprafețelor de răspuns realizată cu programul STAT GRAPHICS, atât în cazul safirului cât și în cazul rubinului, se observă că ea a fost făcută pentru toate cele trei funcții de răspuns, pentru combinații de câte 2 factori, dintre cei trei de importanță primordială prezentați anterior [66].

Parametrul D, poziția planului de focalizare în raport cu suprafața de prelucrat, este al doilea în ordinea importanței după metoda balanței aleatoare. Metoda gradientului stabilește, după cum s-a arătat că poziția optimă pentru planul de focalizare este o treime din înălțimea piesei, poziție pentru care forma alezajului obținut este cât mai apropiată de forma cilindrică.

Ceilalți trei parametri în ordinea importanței sunt numărul de impulsuri, tensiunea de încărcare și capacitatea sistemului de pompaj. La reprezentarea suprafețelor de răspuns prin metoda STAT GRAPHICS, s-au folosit combinații de câte doi factori, dintre acești trei factori obținându-se figurile: 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 și 7.19.

Studiind reprezentările suprafețelor de răspuns se observă că tensiunea, capacitatea și numărul de impulsuri sunt exprimate în unități codificate. Valorile corespunzătoare unităților codificate sunt trecute în tabelele 20 și 21.

Tabelul 20.

u.c.	-1	-0,6	-0,2	0,2	0,6	+1
tensiune [V]	1100	1200	1300	1400	1500	1600
capacitate [μ F]	500	600	700	800	900	1000

Tabelul 21

u.c.	-1	-0,5	0,5	+1
impulsuri	1	2	3	4

Aceste reprezentări ale suprafețelor de răspuns sunt deosebit de utile din punct de vedere tehnologic, pentru identificarea valorilor numerice ale factorilor de influență ce trebuie alese pentru obținerea unor valori impuse ale funcției de răspuns.

Aceste reprezentări grafice pot fi utilizate și pentru optimizarea valorilor funcțiilor de răspuns analizate.

Aceste diagrame se utilizează și pentru a stabili valorile optime ale tensiunii, capacității și numărul de impulsuri în așa fel încât să se obțină cât mai economic un alezaj, în sensul că numărul de rebuturi să fie minim. Reglând instalația laser la valorile determinate pe baza acestor reprezentări grafice, alezajul care se obține, are forma impusă.

Înainte de utilizarea programului STAT GRAPHICS, dimensiunile alezajului se stabileau prin nenumărate încercări experimentale - pierzându-se astfel un număr

SAFIR FUNȚIA X

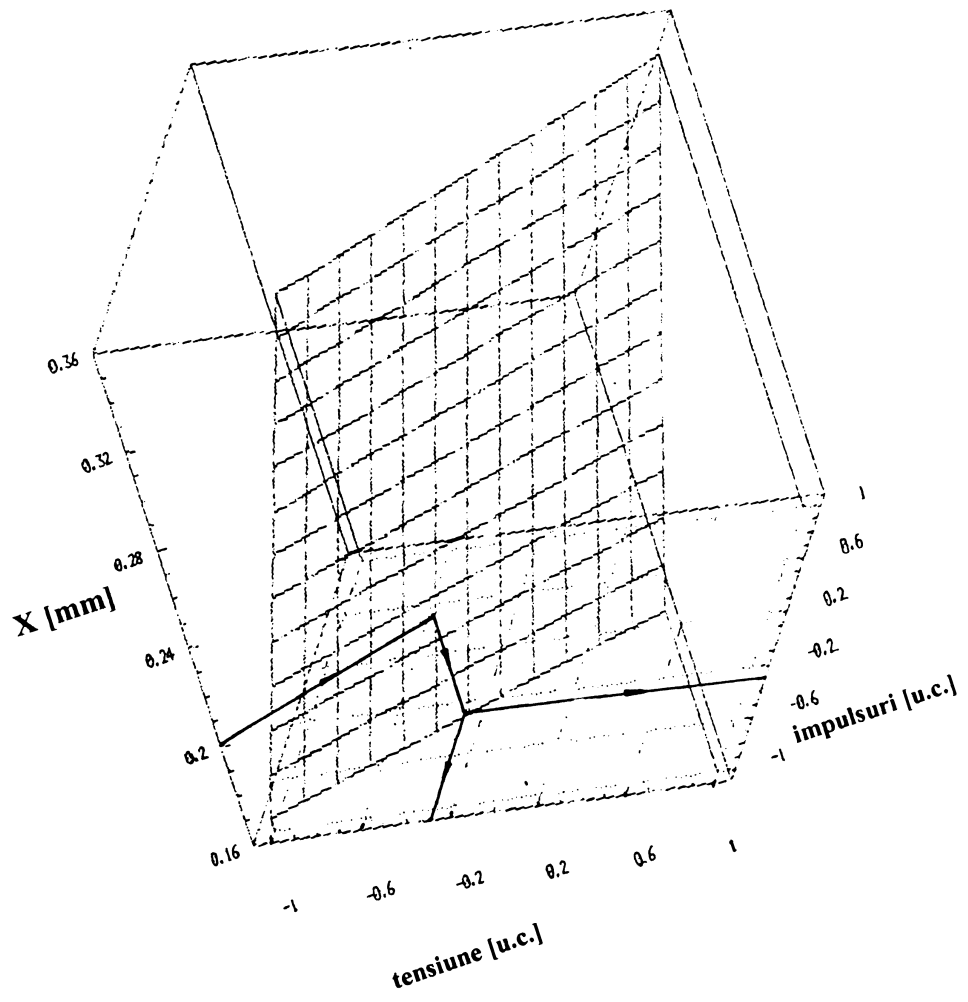


Figura 7.2

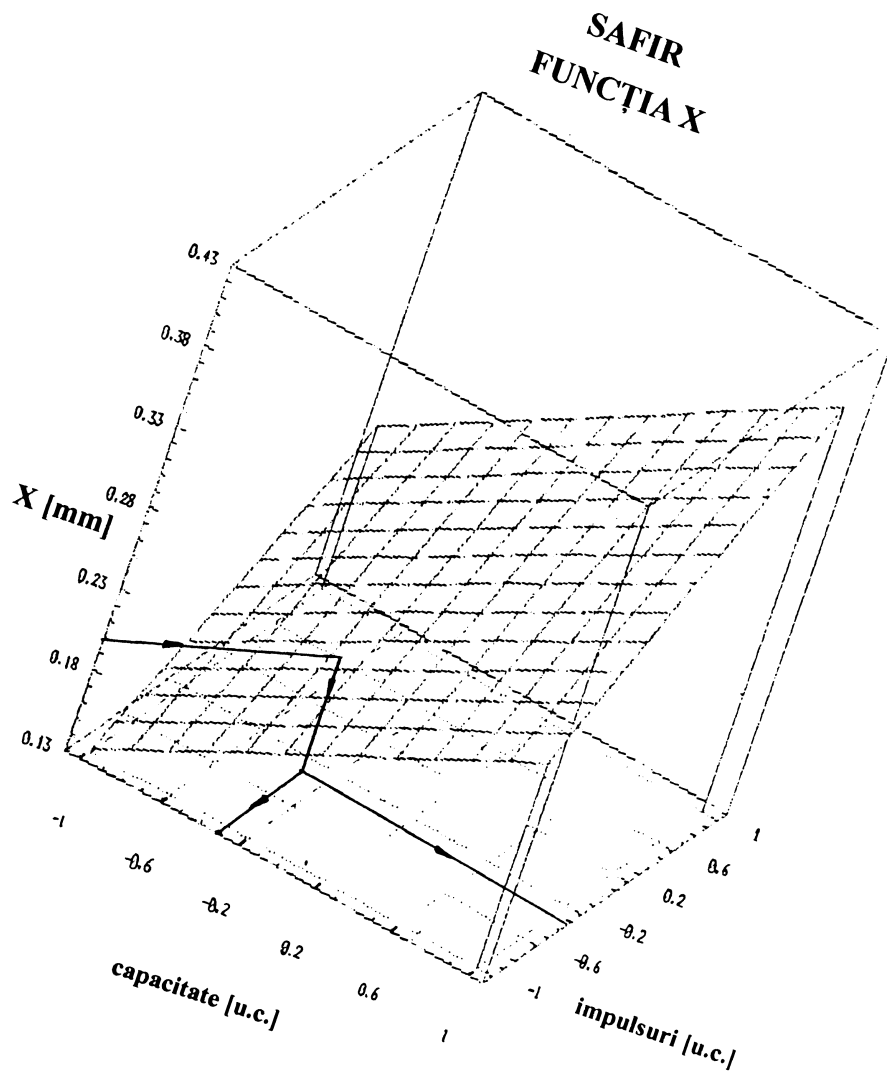


Figura 7.3

SAFIR

FUNȚIA X

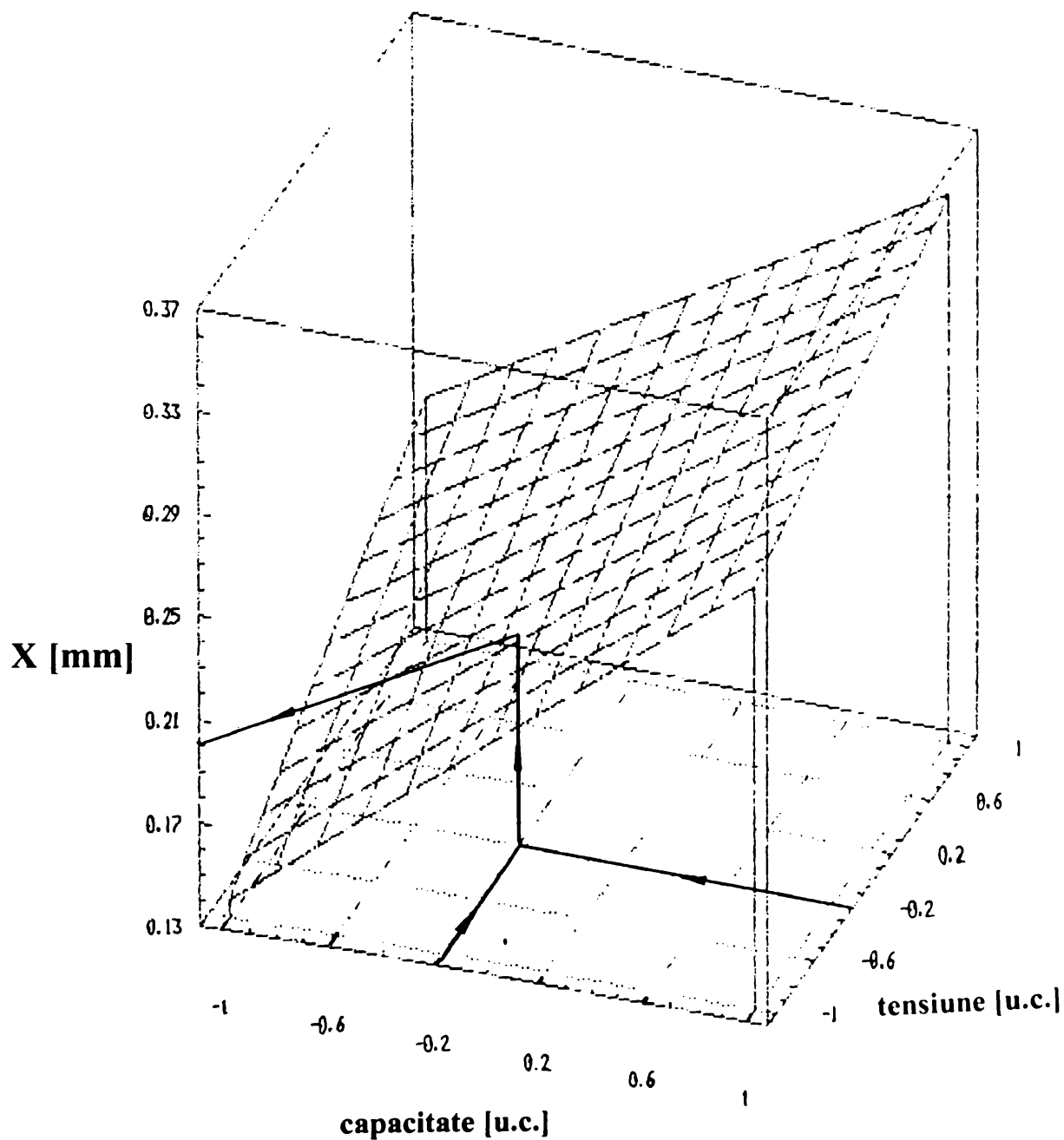


Figura 7. 4

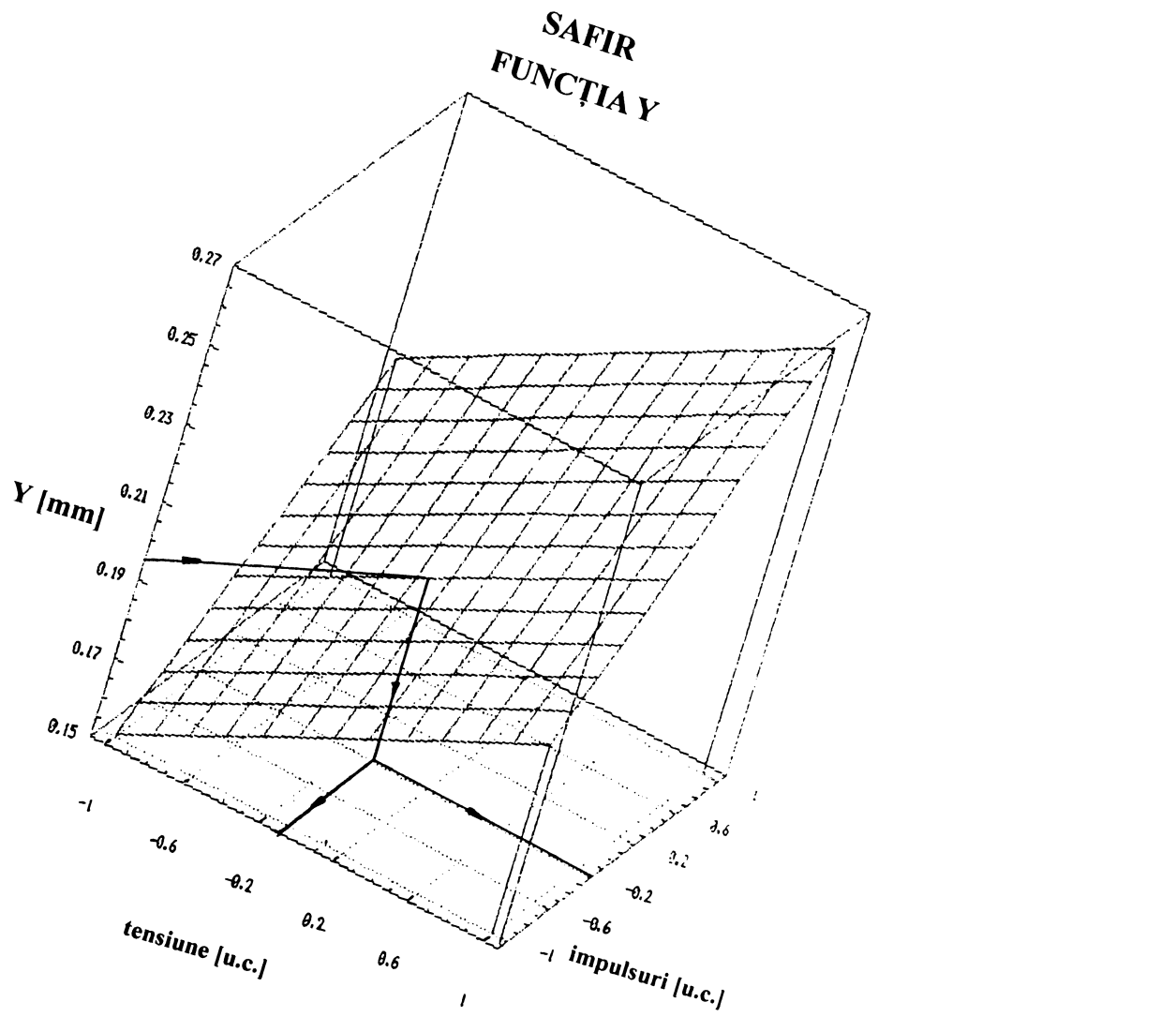


Figura 7. 5

SAFIR

FUNCȚIA Y

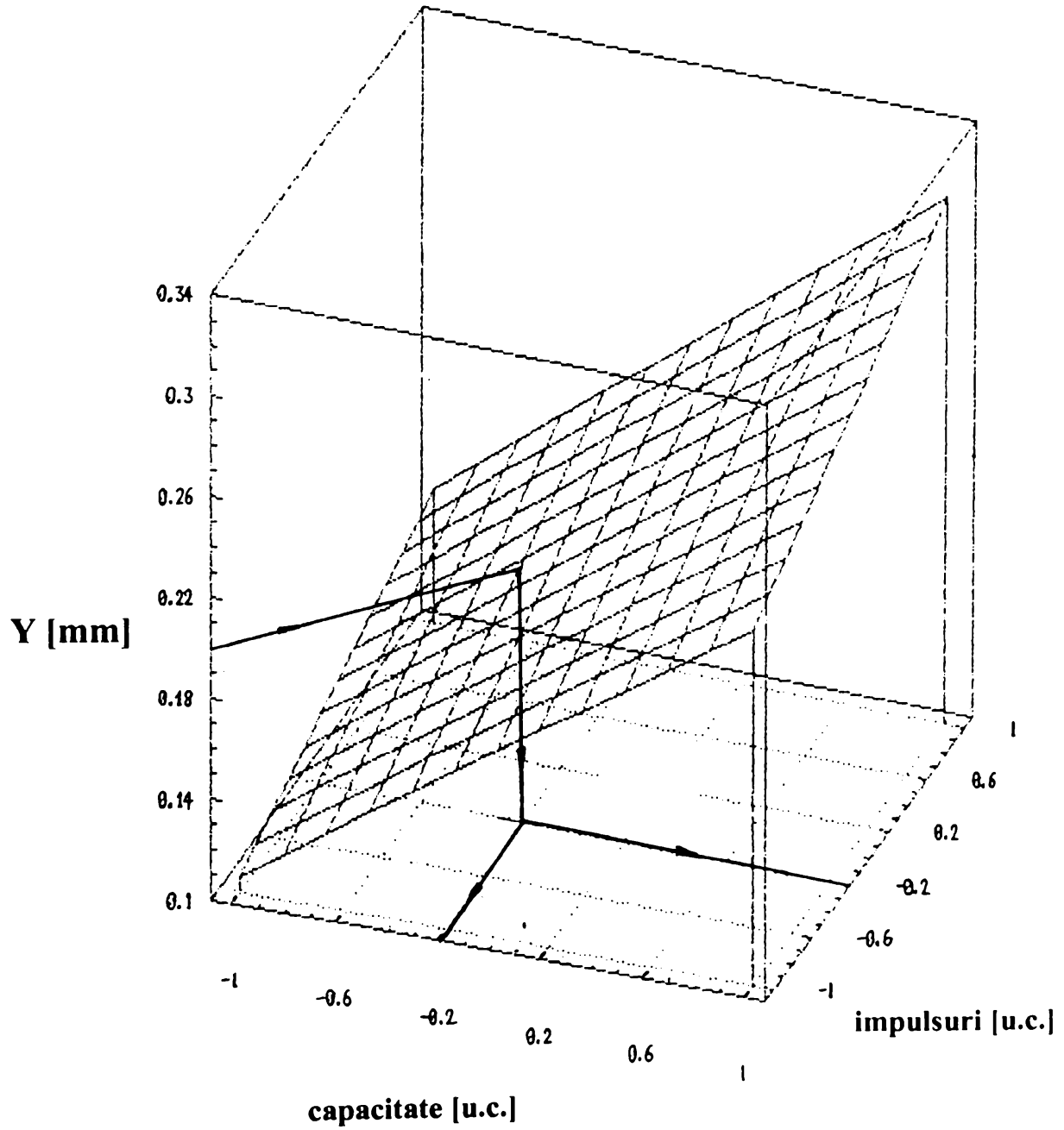


Figura 7. 6

SAFIR FUNȚIA Y

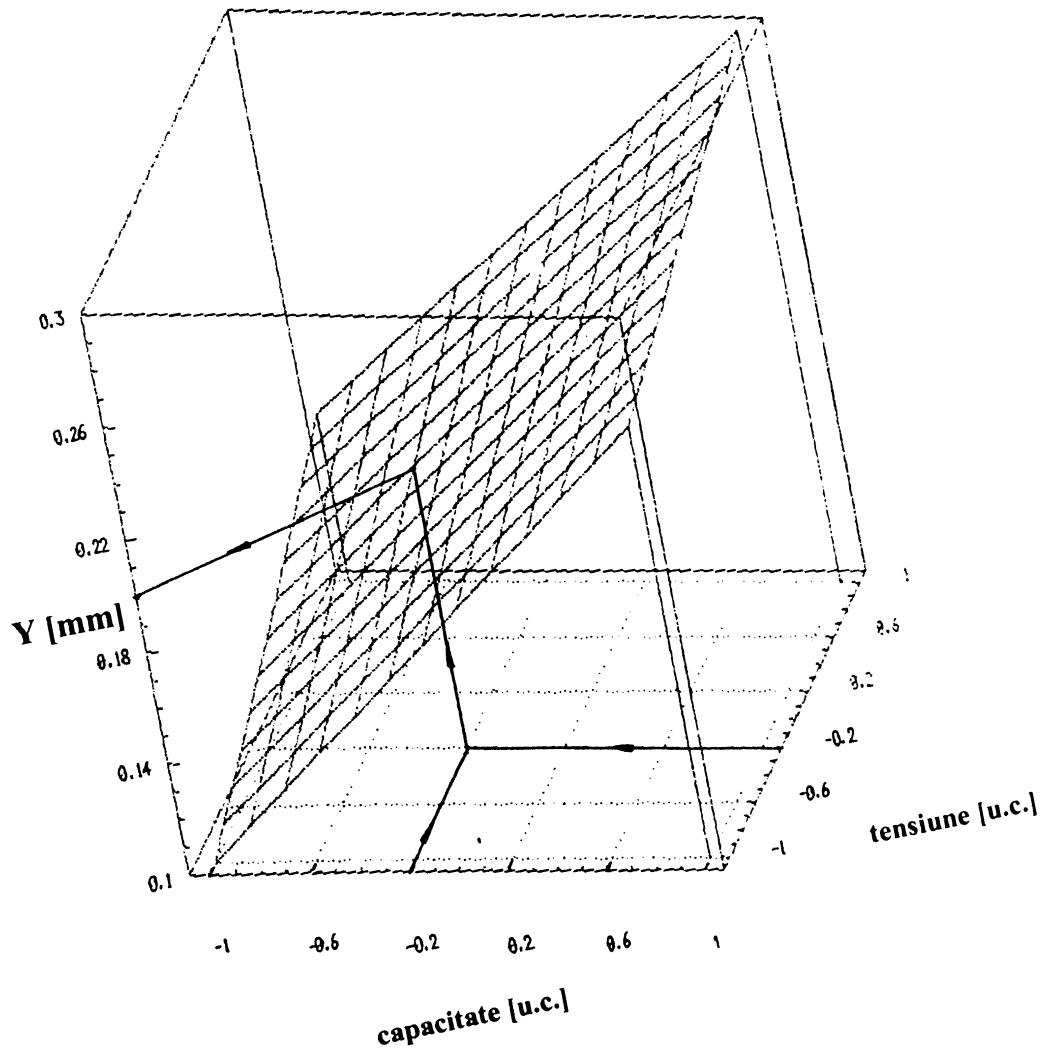


Figura 7.7

**SAFIR
FUNȚIA Z**

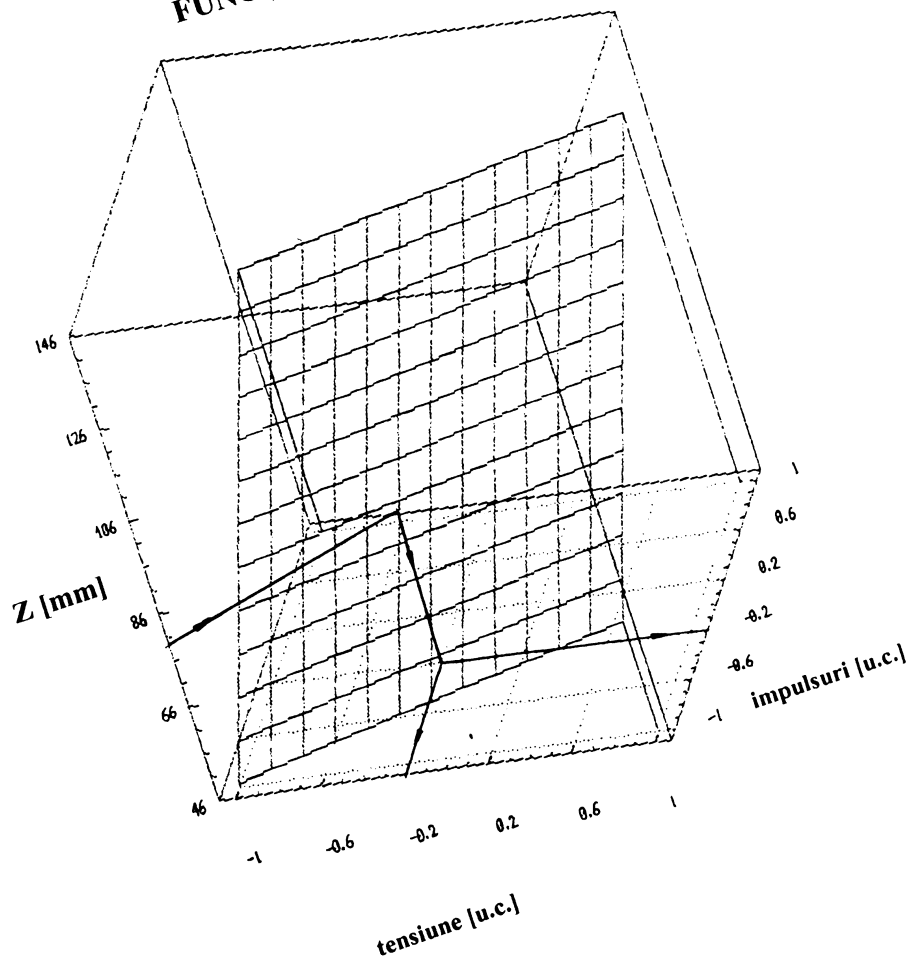


Figura 7.8

SAFIR FUNȚIA Z

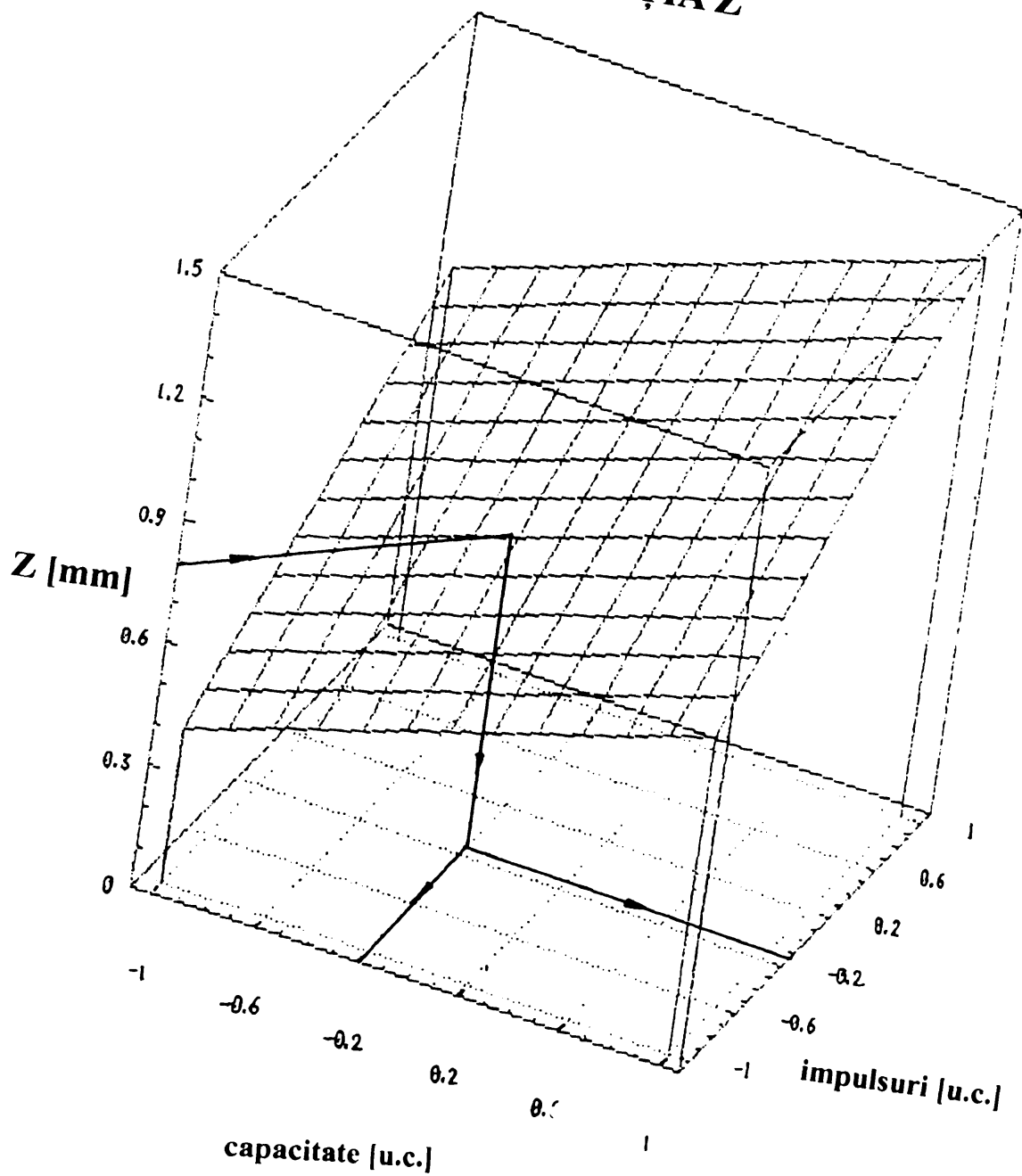


Figura 7.9

SAFIR

FUNȚIA Z

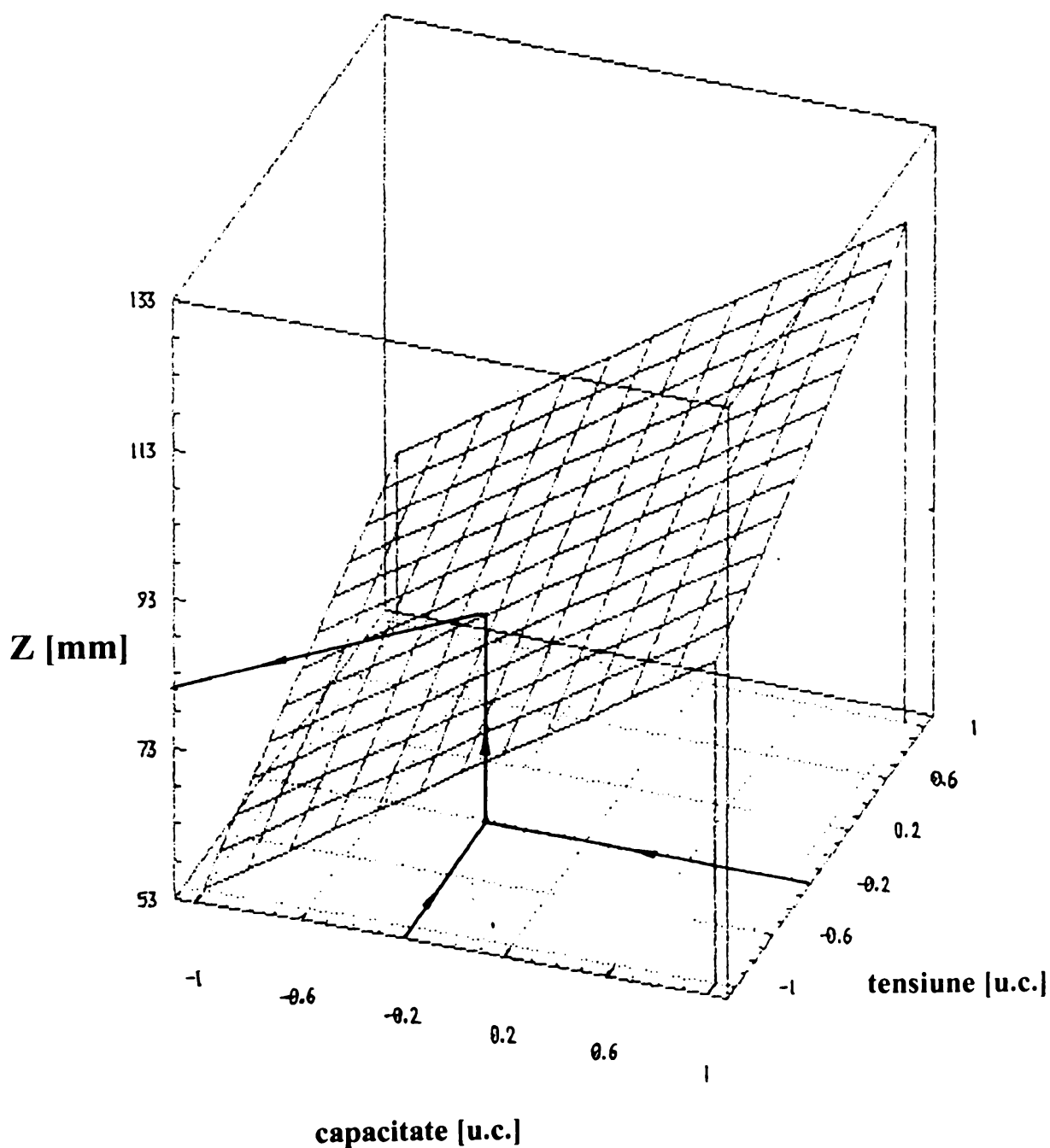


Figura 7. 10

**RUBIN
FUNȚIA X**

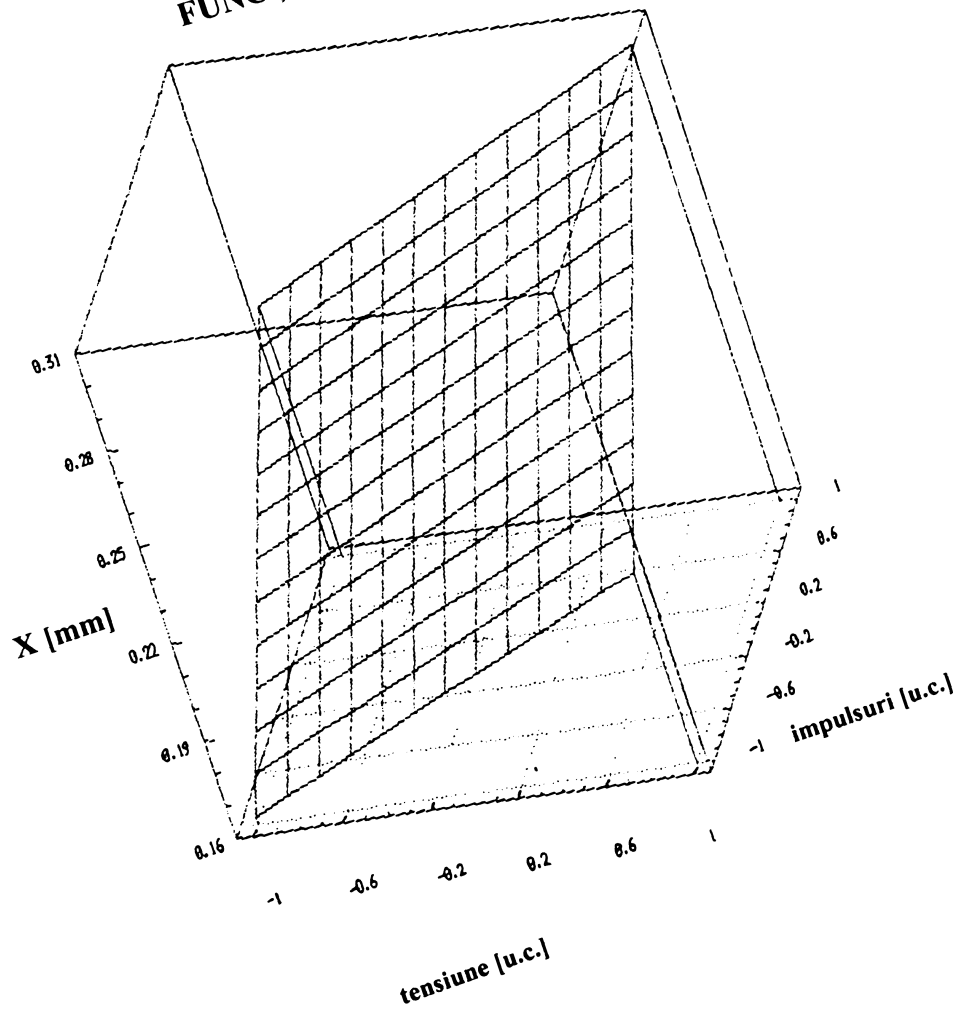


Figura 7. 11

RUBIN
FUNȚIA X

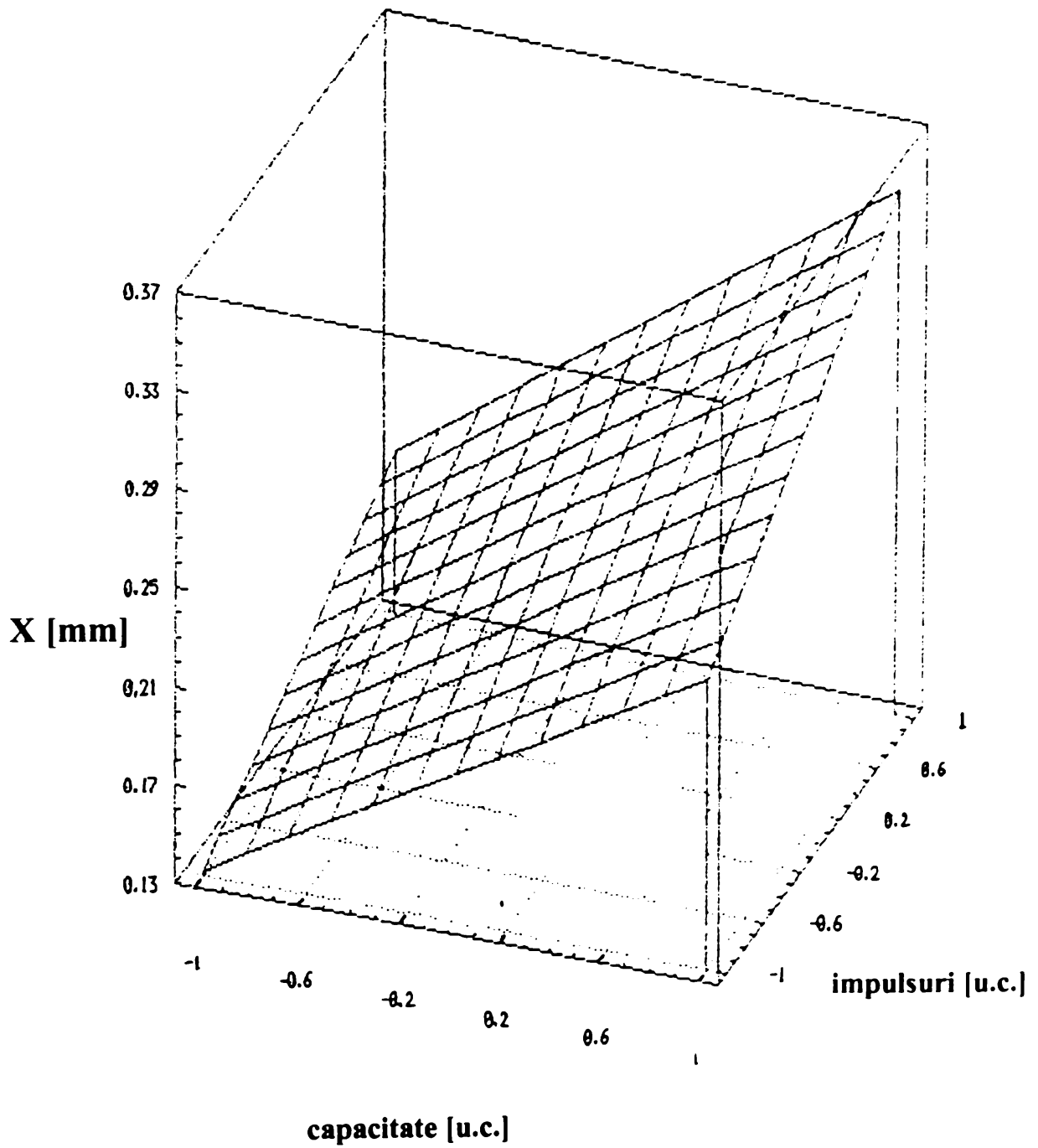


Figura 7. 12

RUBIN

FUNȚIA X

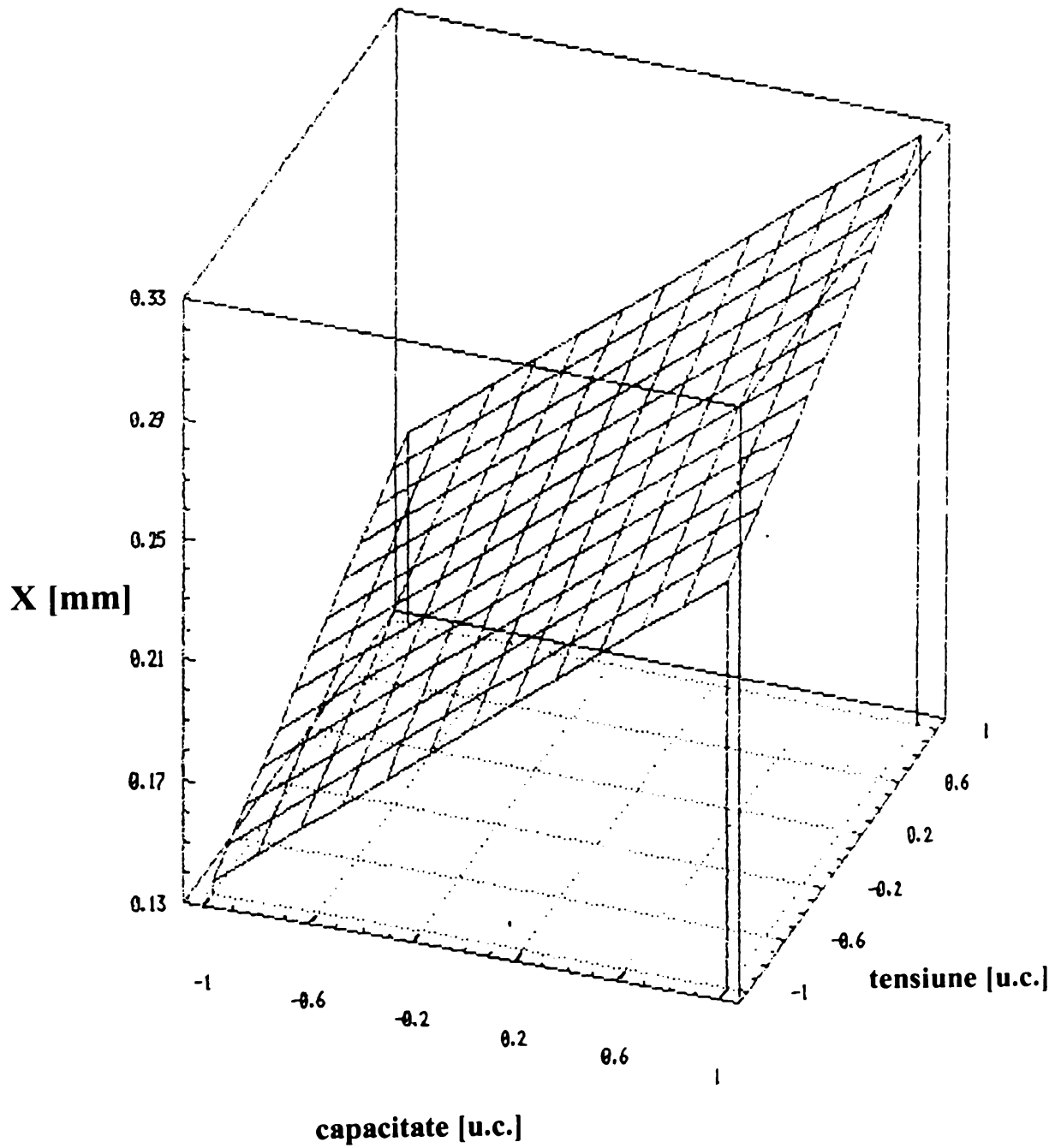


Figura 7. 13

RUBIN FUNȚIA Y

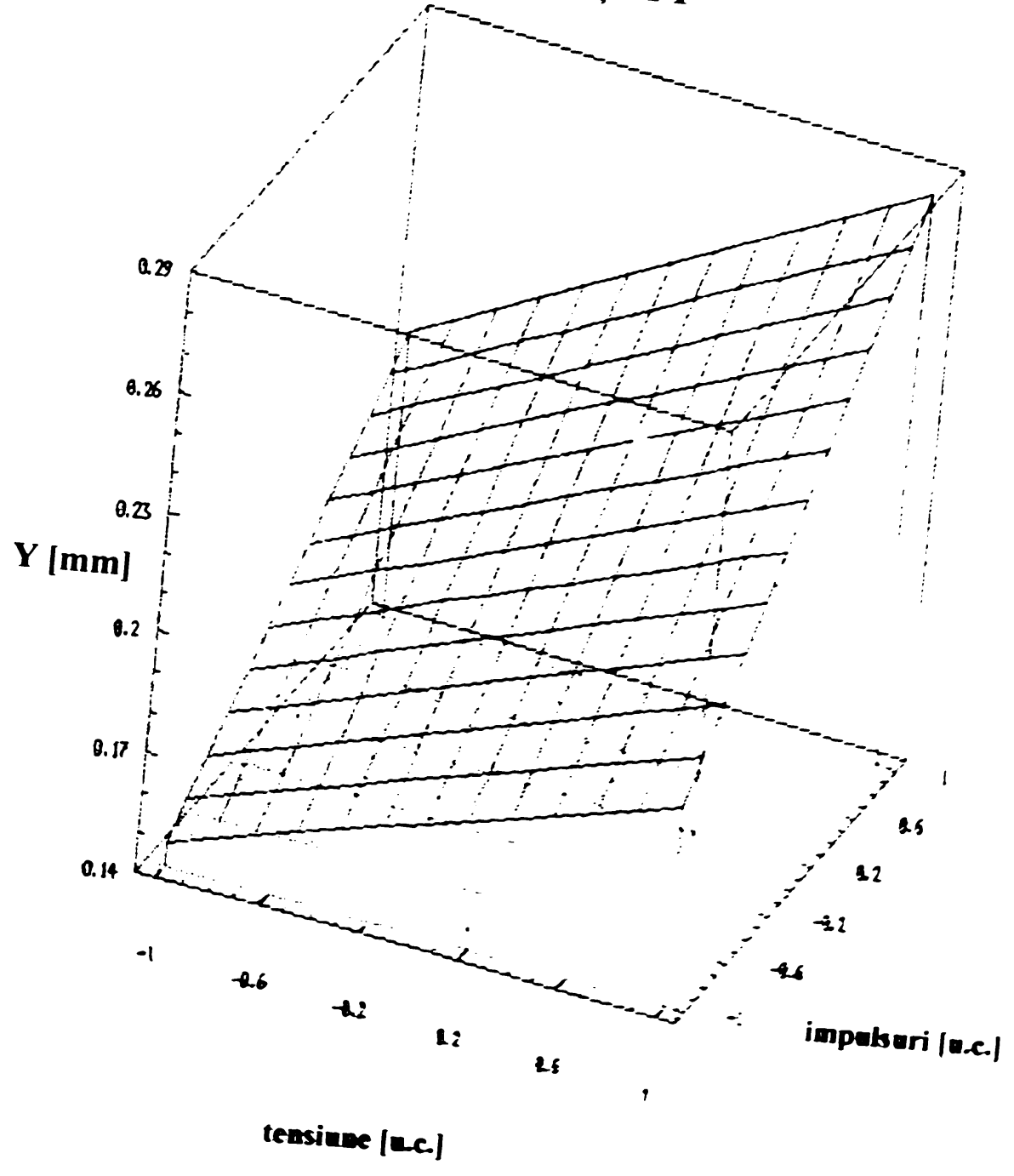


Figura 7. 14

RUBIN

FUNȚIA Y

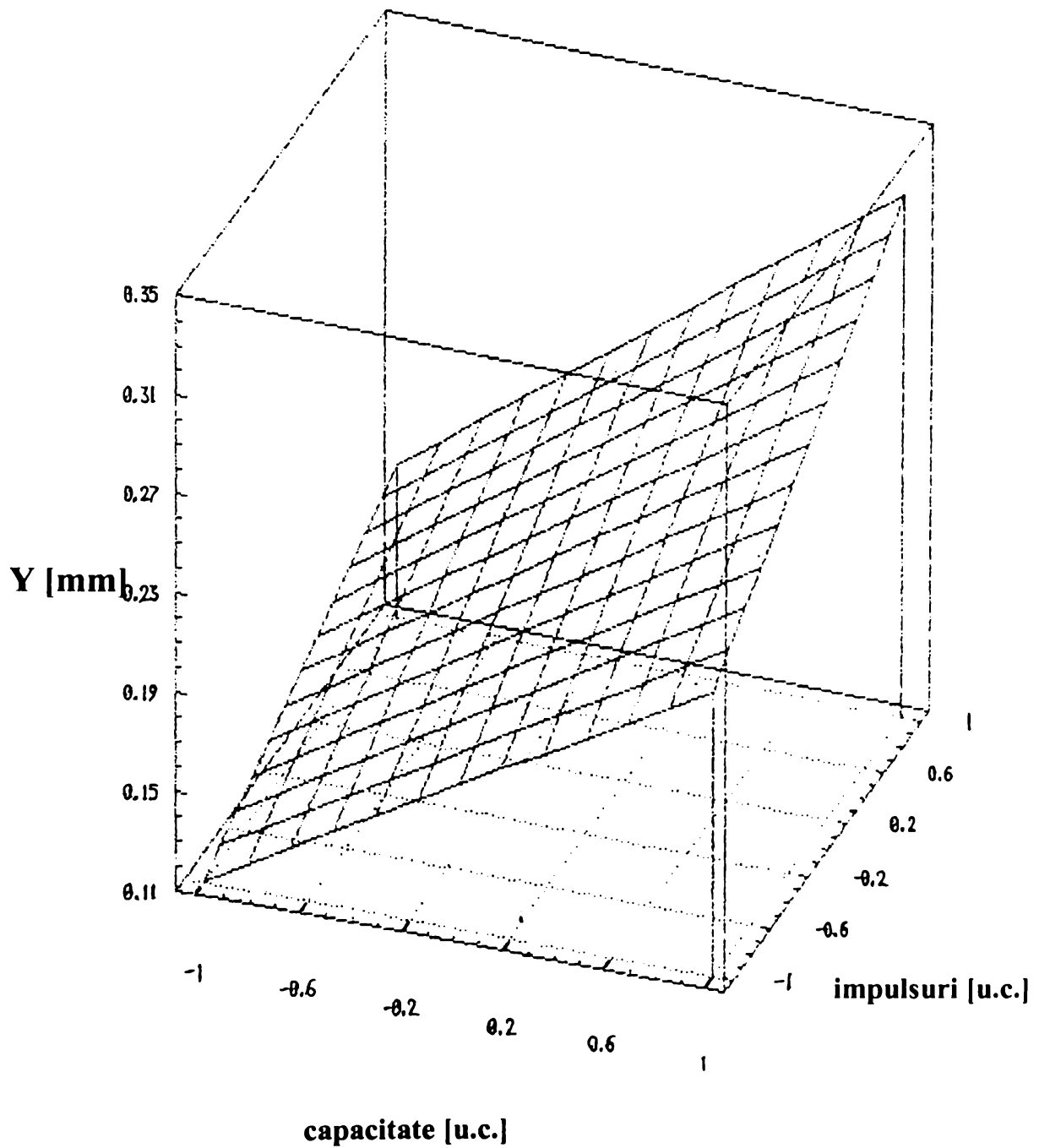


Figura 7. 15

**RUBIN
FUNȚIA Y**

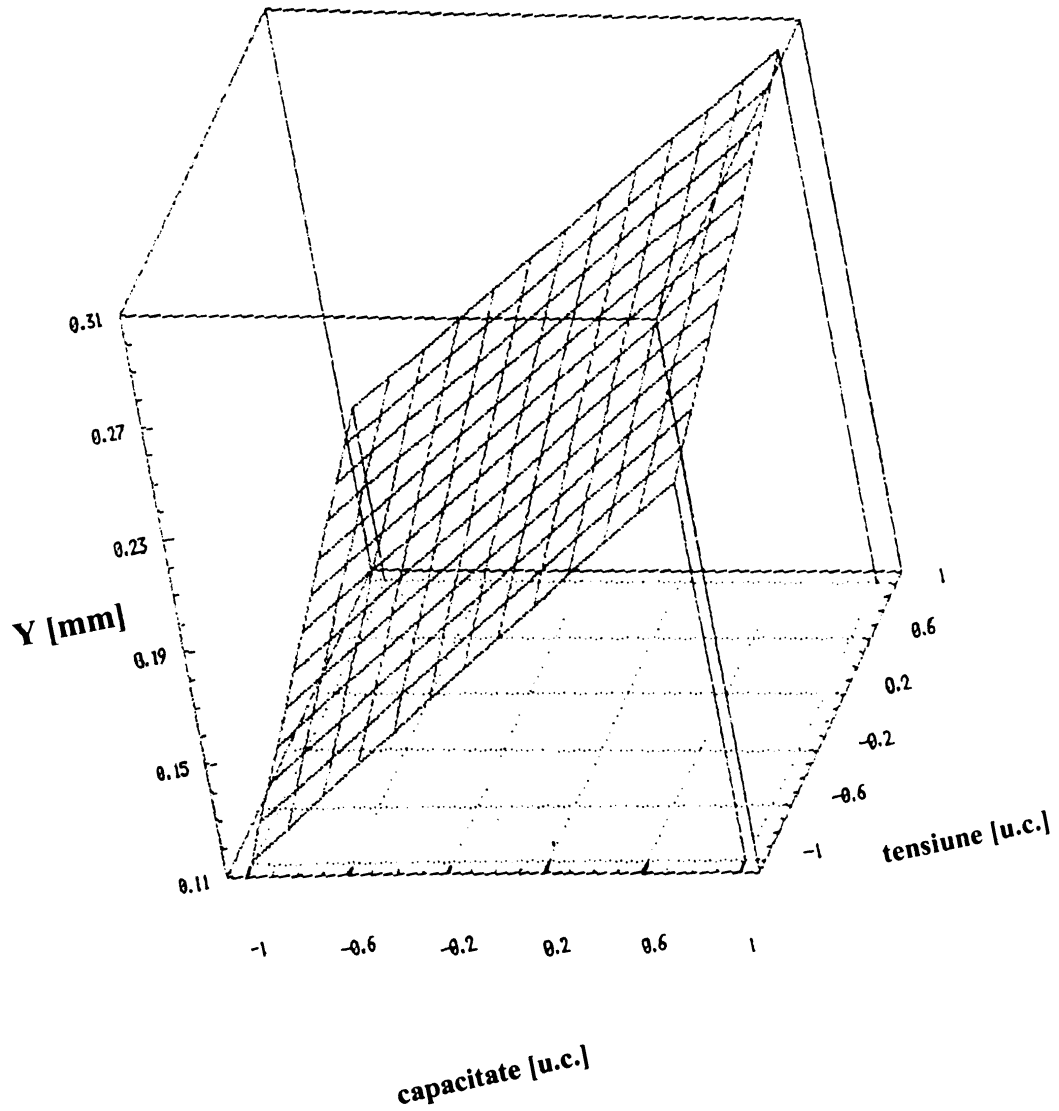


Figura 7. 16

RUBIN FUNȚIA Z

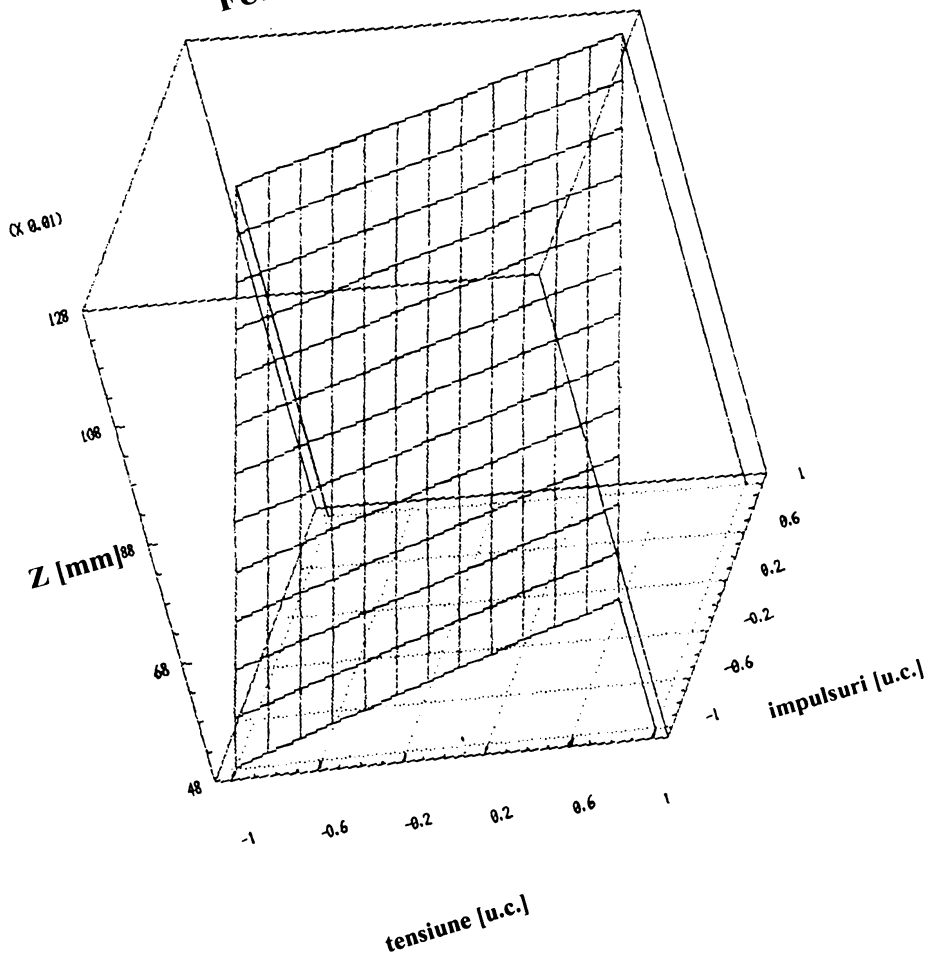


Figura 7. 17

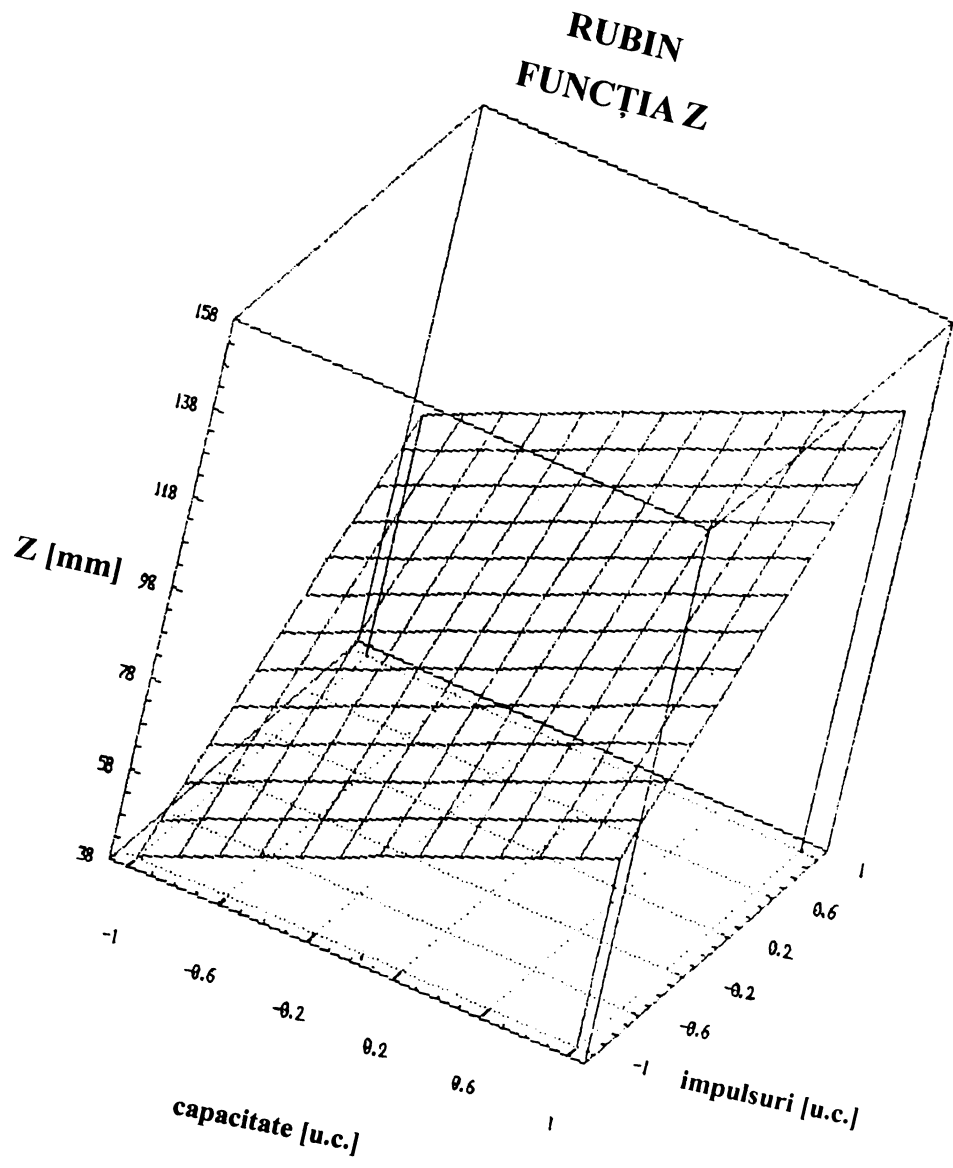


Figura 7. 18

RUBIN

FUNȚIA Z

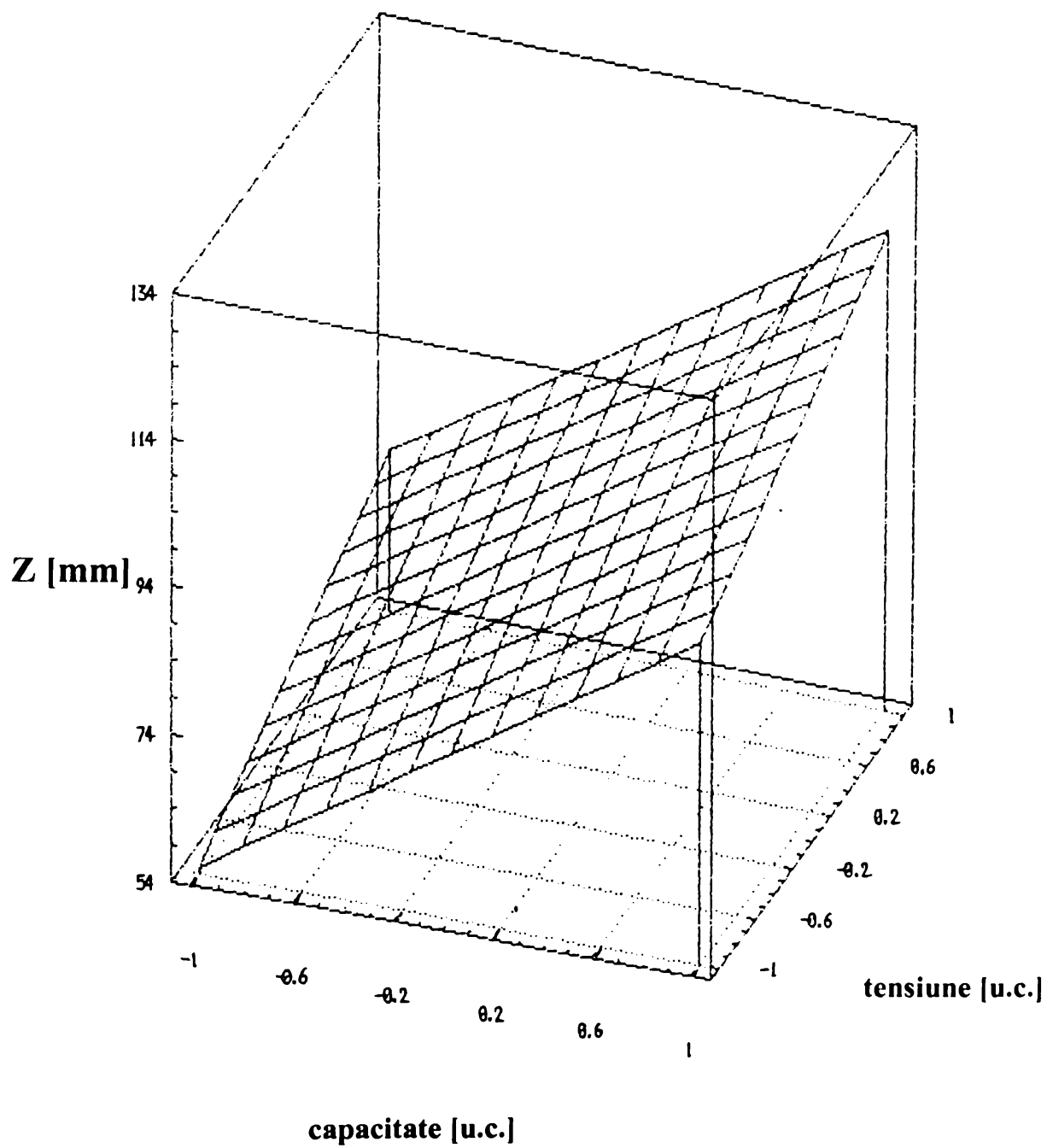


Figura 7. 19

mare de lagăre din safire și rubine. Utilizarea programului STAT GRAPHICS permite realizarea unui alezaj, fără a mai fi nevoie de încercările preliminare.

Un alt aspect al eficienței economice a programului este faptul că se stabilesc valorile tensiunii, capacității și numărul de impulsuri optime pentru obținerea unui alezaj. Valorile tensiunii, capacității și numărul de impulsuri sunt altfel corelate, încât randamentul de obținere al alezajului să fie bun.

Un exemplu concret al modului de utilizare al reprezentărilor suprafețelor de răspuns este următorul: se folosește obținerea unui alezaj într-un lagăr din safir cu $X=0,2$, $Y = 0,2$ și $Z = 0,8$.

Se stabilesc inițial valorile parametrilor instalației laser pentru ca să se obțină un alezaj cu adâncimea $Z = 0,8$ mm.

Din fig. 7.8 se stabilește valoarea tensiunii 1300 V, iar numărul de impulsuri în acest caz este 2.

Din figura 7.9 se stabilește valoarea capacității ca fiind 700 μ F.

Cu fig. 7.10 se verifică, dacă utilizând 1300 V și 700 μ F se poate obține un alezaj cu adâncimea 0,8 mm.

Se observă că cele două valori stabilite ale tensiunii și capacității conduc la obținerea unui alezaj cu $Z = 0,8$.

Cu ajutorul figurii 7.2, 7.3 și 7.4 se stabilesc valorile parametrilor instalației laser în cazul când dorim să obținem un alezaj cu $X = 0,2$ mm.

Din fig. 7.2 se stabilește valoarea tensiunii la 1260 V, iar din tabelul 7.3 se stabilește valoarea capacității de 660 μ F, numărul de impulsuri fiind 2.

Deoarece instalația laser nu permite reglări atât de fine ale tensiunii și capacității se vor utiliza valori rotunjite.

Pentru aceasta se va folosi figura 7.4.

Stabilim pentru capacitate valoarea 700 μ F, iar pentru tensiune valoarea 1300 V. Cu aceste valori din fig. 7.4 se stabilește valoarea lui X, $X = 0,2$ mm.

În mod similar se procedează și pentru variabila Y.

Din fig. 7.5 se extrage valoarea tensiunii 1320 V, iar numărul de impulsuri este 2. Valoarea capacității se extrage din diagrama din fig. 7.6, valoarea ei este 700 μ F.

Cu fig. 7.7 se verifică dacă valorile alese pentru tensiune și capacitate determină obținerea unui alezaj cu $Y = 0,2$ mm.

Deci, utilizând cele 12 reprezentări ale suprafeței de răspuns obținute cu ajutorul programului STAT GRAPHICS, s-au stabilit valorile parametrilor instalației laser în cazul când dorim să obținem un alezaj cu $Z = 0,8$ mm, $X = 0,2$ mm și $Y = 0,2$ mm. Valorile stabilite sunt: tensiunea 1300 V, capacitatea 700 μ F și numărul de impulsuri este 2. Planul focal este plasat la 1/3 din înălțimea piesei.

În felul acesta se procedează și în cazul când vrem să stabilim valorile parametrilor instalației laser pentru a obține un alezaj de o formă impusă, într-un lagăr din rubin.

După cum s-a arătat din punct de vedere tehnologic aceste reprezentări ale suprafețelor de răspuns prin programul STAT GRAPHICS sunt foarte importante pentru prelucrarea alezajelor de dimensiuni impuse în lagărele de safire și rubine. Fără aceste reprezentări, pentru a se obține într-un lagăr un alezaj de o anumită formă erau necesare un număr mare de încercări experimentale de tatonare până se obținea un alezaj cu aceleași dimensiuni ca cele prescrise. În urma acestor încercări de tatonare se prelucrau alezaje într-un număr mare de lagăre considerate ulterior ca rebuturi.

8. Studiul defectelor structurii cristaline din lagărele de safir sau rubin strapunse cu laser

În timpul prelucrării cu laser a lagărelor din safire și rubine artificiale, materialul prelucrat este expus la temperaturi extrem de ridicate (vezi capitolul 6). Încălzirea materialului depinde de coeficientul de absorbție al materialului. Doar o parte a radiației laser este absorbită de suprafața de prelucrat, restul radiației este reflectată. Zonele din materialul de prelucrat aflate sub suprafața prelucrată, se încălzesc prin absorbția energiei laserului spre interior.

Procesele de absorbție a energiei laser în materiale parțial transparente pot fi considerate uniform distribuite sau strict localizate, după cum în structura materialului și mai ales în stratul de suprafață lipsesc și respectiv sunt prezente impurități și defecte de structură cristalină puternic absorbante.

Rubinul și safirul sintetic utilizat pentru prelucrarea lagărelor de alunecare analizate, străpunse cu laser, au fost crescute prin metoda Verneuil.

Defectele întâlnite în cristalele de rubin și safir artificial crescute prin metoda Verneuil sunt: dislocațiile, structura de blocuri de mozaic, incluziuni metalice și bule de gaze. [1], [11], [12], [13]

În cazul blocurilor de mozaic, anumite fragmente din rețeaua cristalină s-au rotit față de orientarea de bază a rețelei cristaline. Aceste porțiuni rotite ale rețelei cristaline sunt mărginite de dislocații.

Dislocațiile sunt defecte liniare care sunt răspunzătoare pentru alunecarea care apare în rețeaua cristalină. Alunecarea este o translație a unei părți a cristalului în raport cu alta, fără o schimbare a volumului. Când alunecarea se produce într-un cristal real, nu toți atomii aflați într-un plan de alunecare se mișcă simultan peste cei de dedesubtul acestui plan. La un moment dat unii dintre atomi s-au mișcat în noile lor poziții în timp ce alții încă nu au făcut-o, astfel încât deplasarea părții de sus a cristalului în raport cu cea de jos variază de la o regiune la alta a planului de alunecare. Liniile din planul de alunecare ce separă regiuni pentru care alunecarea a avut loc de cele pentru care alunecarea nu a avut loc se numesc dislocații. [1], [70], [17]

Există trei tipuri fundamentale de dislocații: dislocații marginale, dislocații elicoidale și dislocații mixte.

Dislocația marginală poate fi imaginată ca fiind produsă prin inserțiunea unui extraplan de atomi pe jumătatea superioară a structurii cristaline. Atomii din jumătatea superioară a cristalului sunt comprimați prin inserțiune; cei din jumătatea inferioară sunt extinși, figura 8.1.

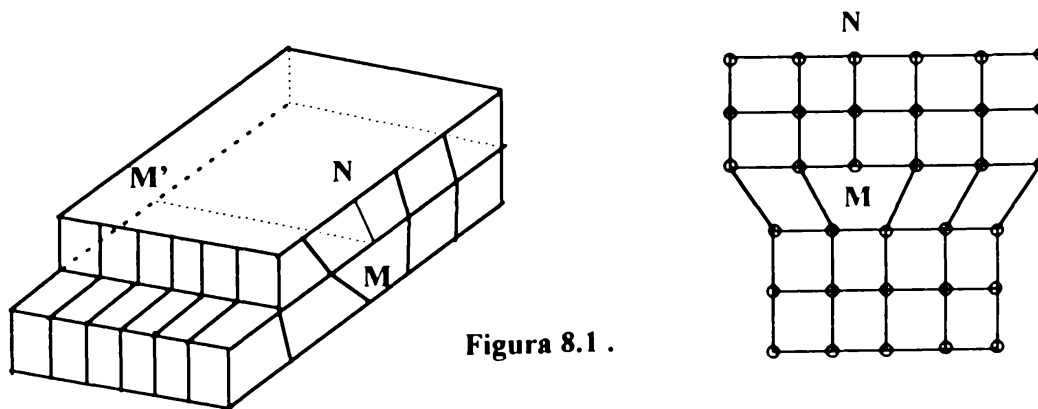


Figura 8.1 .

În figura 8.1 se observă că lunecarea pe o distanță atomică s-a produs peste jumătatea stângă a planului de lunecare, dar nu și peste jumătatea din dreapta. Frontiera dintre regiunea lunecată și cea nelunecată (M'M) se numește dislocație marginală.

Dislocația elicoidală, rezultă prin secționarea parțială a unui bloc reticular și deplasarea unei părți a rețelei față de cealaltă cu o distanță egală cu o perioadă reticulară, figura 8.2.

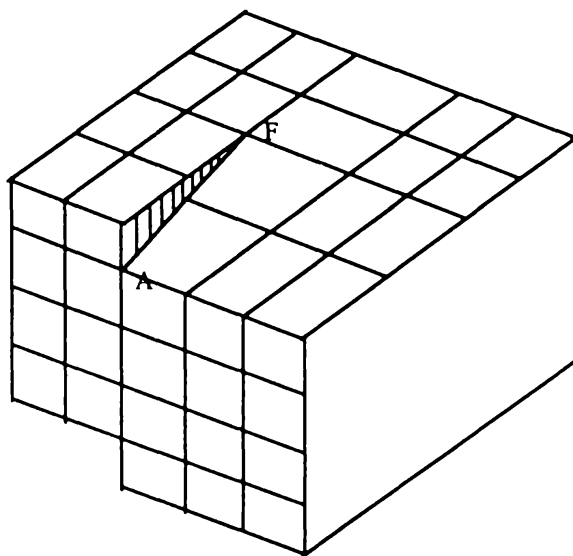


Figura 8.2

Linia AF este linia de dislocație. Dislocația elicoidală poate fi imaginată ca fiind produsă prin tăierea cristalului cu o lamă și forfecarea lui paralelă cu marginea tăieturii pe o distanță atomică. O dislocație elicoidală, transformă planele succesive de atomi în suprafața unei elice, aceasta explică numele dislocației.

Al treilea tip fundamental de dislocație este dislocația mixtă, o combinație între dislocația marginală și dislocația elicoidală. În figura 8.3 este reprezentată o porțiune mică a unui cristal cubic simplu, în care se poate observa că dislocația mixtă EM a luat naștere printr-o alunecare incompletă a părții superioare AB, peste cea inferioară. În E dislocația este pur elicoidală, iar în M este pur marginală.

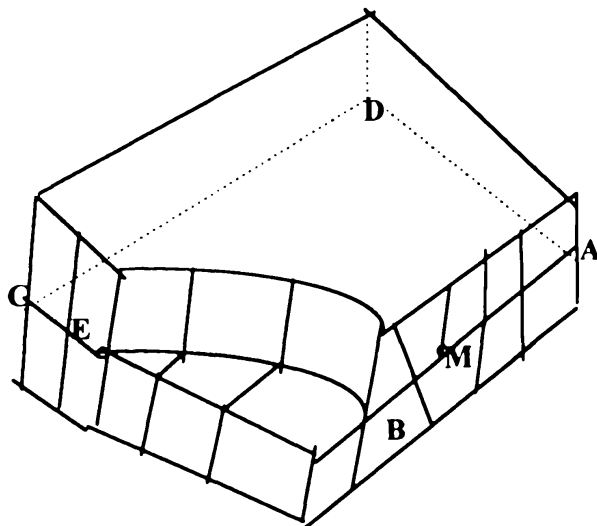


Figura 8.3

Studiind dislocațiile apărute în cristalele crescute prin metoda Verneuil, se observă că ele sunt mixte, adică dislocația are ambele orientări, deplasarea planelor de alunecare fiind deci caracterizată atât printr-o componentă marginală cât și printr-o componentă elicoidală.

În cazul obținerii cristalelor prin metoda Verneuil, cea mai simplă posibilitate de formare a dislocațiilor este trecerea lor din germenele de cristalizare, în structura cristalului rezultat.

Datorită neomogenității suprafeței germenului de cristalizare ce poate să conțină o serie de defecte de suprafață, stadiile inițiale ale creșterii pot avea loc în condiții necorespunzătoare. De obicei, acestea determină formarea incluziunilor de diverse tipuri, care în final conduc la apariția dislocațiilor. [11]

În vecinătatea incluziunilor de diferite tipuri, valorile tensiunilor de deformare pot să depășească cu mult valorile medii din cristal. Ca urmare, aceste locuri sunt considerate concentratori de tensiuni, devenind locurile cele mai probabile pentru generarea dislocațiilor.

Tensiunile termice din cristal sunt de asemenea generatoare de dislocații.

În cristalul obținut prin metoda Verneuil, distribuția temperaturii nu numai că este uniformă, dar în majoritatea cazurilor gradientul de temperatură de-a lungul cristalului nu este constant.

O astfel de distribuție complexă a temperaturii determină o dilatare termică neuniformă a diferitelor părți ale cristalului, ducând la interacțiunea lor elastică și ca rezultat apariția în cristal a dislocațiilor.

Punerea în evidență a dislocațiilor pentru a putea fi studiate cu microscopul electronic se face cu ajutorul metodei corodării chimice. [56]

Safirul și rubinul sunt solubile în bisulfat de potasiu, KHSO_4 , la $600\text{ }^\circ\text{C}$. Dizolvarea cristalului apare pe o adâncime mică și are ca efect corodarea suprafeței.

Fenomenul de dizolvare constă în scoaterea atomilor de pe suprafața cristalului, mai exact prin eliberarea atomilor de pe treptele monomoleculare, acesta fiind un proces invers procesului de creștere.

Fenomenul de dizolvare a cristalelor de safir și rubin are următoarele etape:

- a) difuzia moleculelor reactivului spre suprafața cristalului.
- b) absorbția reactivului pe suprafața cristalului.
- c) reacția cu suprafața cristalului.
- d) desorbția produșilor de reacție.
- e) difuzia produșilor în soluție.

Lagărele de alunecare de safir și rubin artificial având prelucrat în ele cu laser un microalezaj, au fost introduse într-un creuzet de porțelan. Deasupra s-a presărat reactivul de corodare, KHSO_4 .

Creuzetul a fost încălzit la temperatura de $600\text{ }^\circ\text{C}$ și păstrat la această temperatură timp de o oră. După tratamentul termic creuzetul cu probele a fost răcit în cuptor și în final, lagărele corodate au fost spălate cu apă distilată, apoi uscate și studiate la microscopul electronic.

Atât suprafața lagărelor de safir cât și a lagărelor de rubin studiată la microscopul electronic este formată din numeroase conuri.

Conurile se datorează solubilității diferite, după direcții cristalografice diferite a safirului și rubinului artificial în KHSO_4 . Solubilitatea este o proprietate vectorială și de aceea viteza de solubilitate a safirului și rubinului artificial se schimbă în funcție de poziția planelor cristalografice. În cazul dislocațiilor, poziția planelor cristalografice fiind puternic perturbată, viteza de solubilitate scade puternic, iar dislocația are un relief caracteristic.

Figura 8.4 reprezintă un lagăr de safir mărit de 800 de ori. Se observă omogenitatea dimensională a cristalelor și lipsa defectelor.

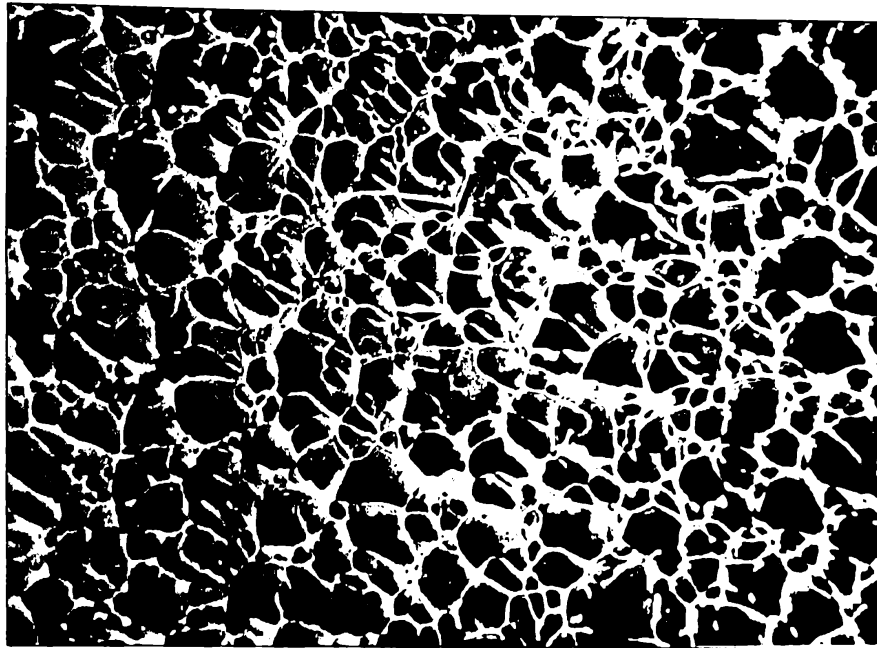


Figura 8.4

Figura 8.5 reprezintă un lagăr de rubin artificial, mărit de 800 de ori. Se observă omogenitatea dimensională a cristalelor și lipsa defectelor.

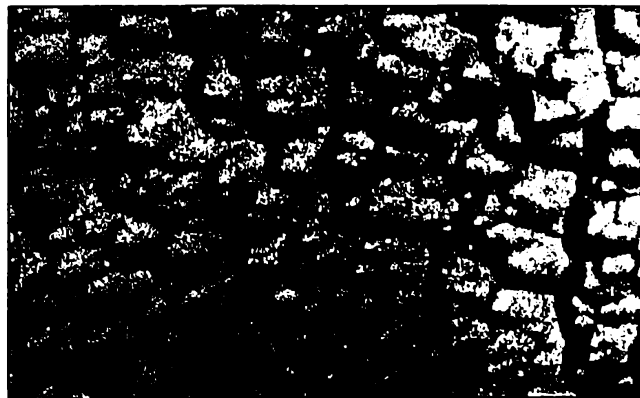


Figura 8.5

Figura 8.6 reprezintă un lagăr de safir artificial. Se observă o translație mecanică pronunțată, datorită solicitărilor mecanice apărute în timpul procesului de prelucrare tehnologică a lagărului.

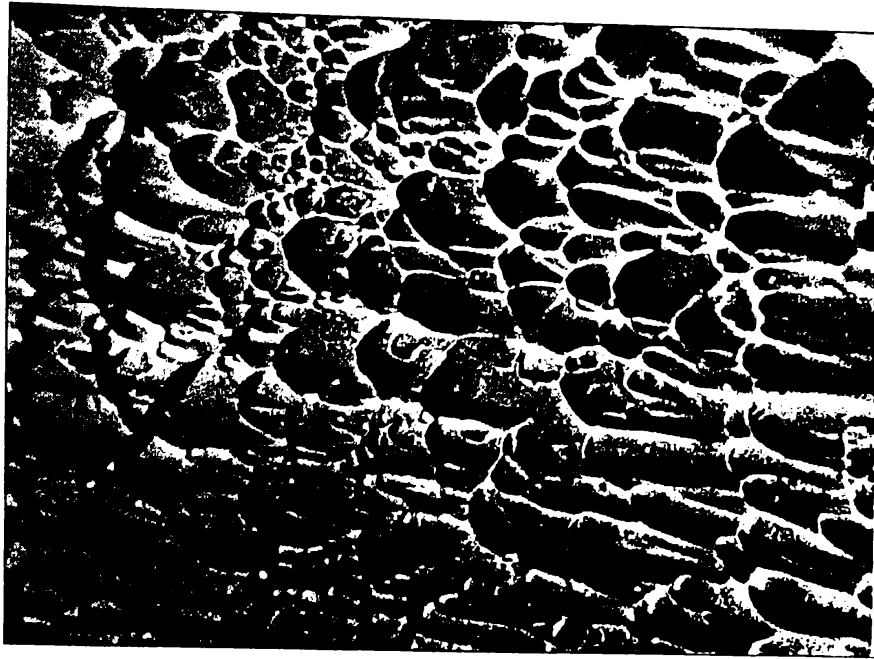


Figura 8.6

Figura 8.7 reprezintă un lagăr de safir artificial. Se evidențiază clar o dislocație care traversează secțiunea examinată.

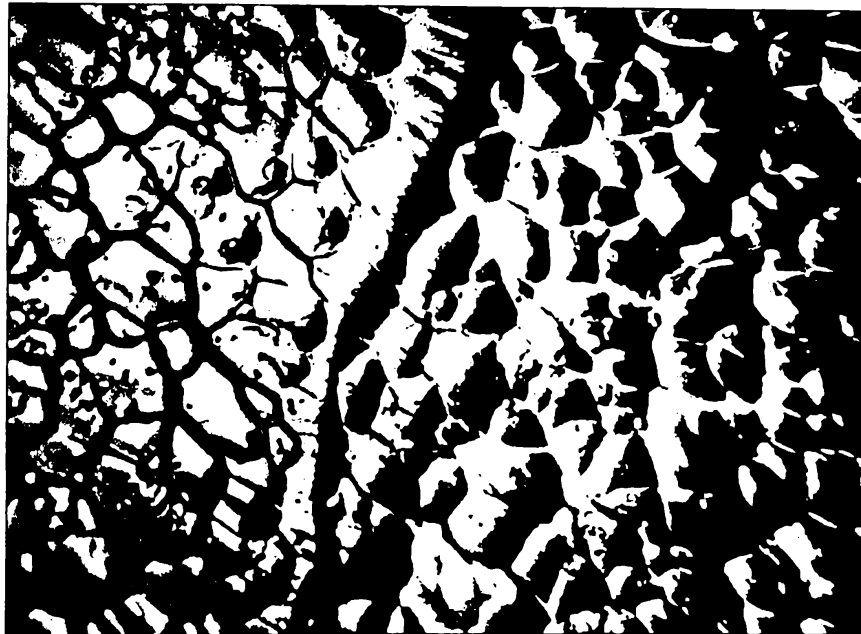


Figura 8.7

Dislocațiile sunt defecte puternic absorbante a energiei laser de aceea la o atentă analiză microscopică a lagărelor străpunse cu fascicol laser se observă că dacă o dislocație se găsește întâmplător în vecinătatea zonei erodate de fascicolul laser, descori în dreptul acelei dislocații apare o microfisură.

Microfisura respectivă transformă piesa într-un rebut, figura 8.8.

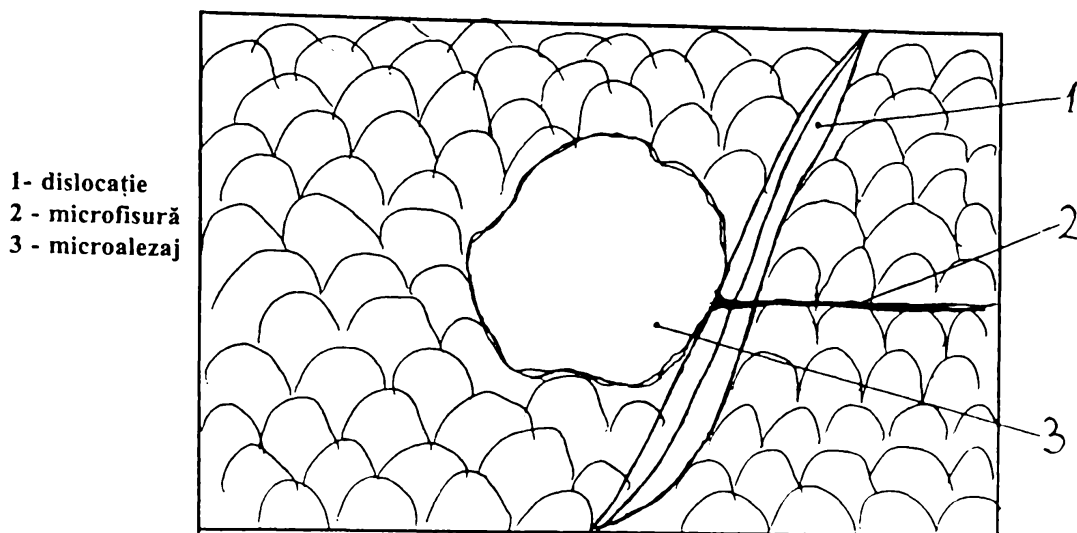


Figura 8.8

Neajunsurile care apar în timpul prelucrării microalezelor cu fascicul laser sunt microfisurile care se dezvoltă în jurul cavității prelucrate. Microfisurile se datorează gradientilor mari de temperatură care există în timpul prelucrării cu laser [21]. Pentru a reduce gradientii de temperatură se propune încălzirea lagărelor la temperaturi înalte, astfel încât să se reducă diferența dintre temperatura suprafeței de prelucrat și temperatura indusă de fasciculul laser.

Datorită temperaturii ridicate dezvoltate de fasciculul laser, microalezajul obținut are suprafața erodată. Studiind la microscop această zonă se observă că structura cristalină corespunzătoare este puternic deformată, practic distrusă. Această zonă a cărei grosime este de 30 - 40 μm este îndepărtată ulterior prin diverse procedee tehnologice.

Pentru a se îmbunătăți calitatea lagărelor prelucrate cu fascicul laser se propune un tratament termic de recoacere în vid cu $T=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $t=1$ ora. În urma tratamentului termic stabilitatea la eroziune superficială cu fascicul laser crește. Faptul este explicat prin recrystalizarea substratului de grosime 5 - 40 μm , cu concentrație ridicată în impurități și defecte structurale rezultate la prelucrarea mecanică și caracterizate prin coeficienți locali de absorbție a radiației laser foarte mari.

9. Studiul calității suprafețelor lagărelor din safire și rubine artificiale

Studiul calității suprafețelor lagărelor s-a făcut cu ajutorul unui microscop electronic cu baleiaj, la Universitatea Tehnică din München, Germania, Catedra de Mineralogie și Geochimie aplicată, sub îndrumarea prof.dr.ing. Giulio Morteani.

Suprafețele lagărelor din safire și rubine sintetice, datorită rugozității extrem de scăzute, trebuie teoretic să fie lipsite de orice urmă a prelucrării tehnologice.

Pentru început s-au studiat două lagăre plane, unul din safir, figura 9.1 și celălalt din rubin, figura 9.2.

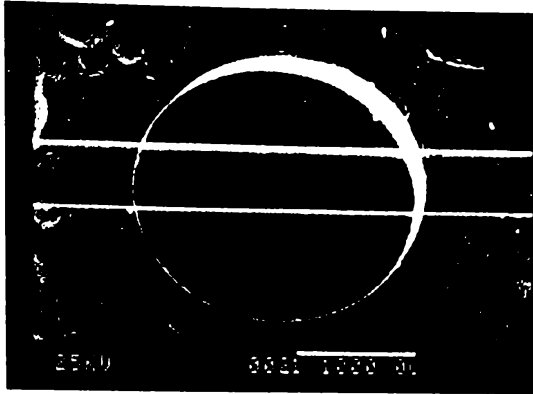


Figura 9.1

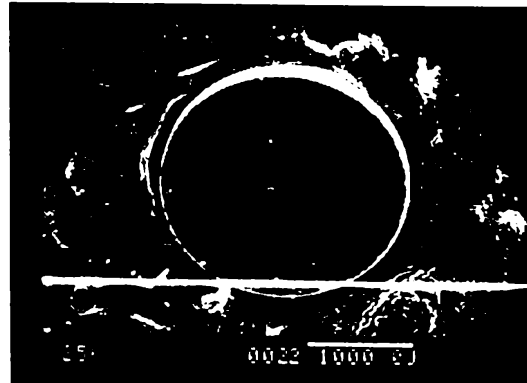


Figura 9.2

Microscopul electronic cu baleiaj ovalizează figura, dar la microscopul stereoscopic s-a observat că lagărele sunt circulare. În figurile 9.3, 9.4, 9.5, 9.6 și 9.7 s-au studiat muchiile.



Figura 9.3

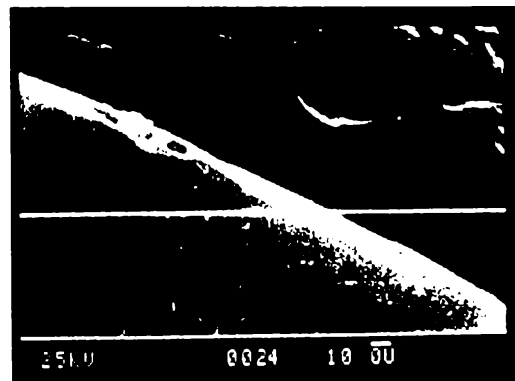


Figura 9.4



Figura 9.5

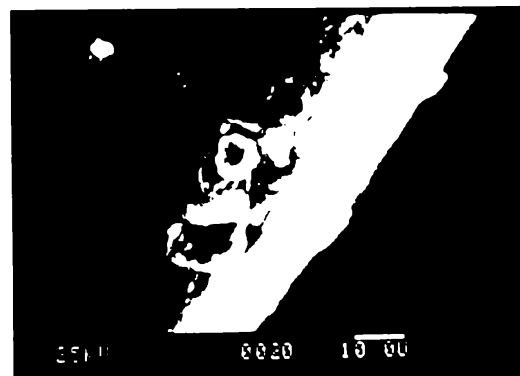


Figura 9.6



Figura 9.7

În figura 9.7 este o porțiune din muchia lagărului de rubin care este perfectă.

În figurile 9.3, 9.4, 9.5 și 9.6 se remarcă că muchiile prezintă ciobituri.

Tot din aceste fotografii se remarcă că suprafața plană este mai netedă decât suprafața cilindrică exterioară. Pe suprafața plană nu se văd urme ale prelucrării tehnologice, în schimb pe suprafețele cilindrice sunt vizibile urmele prelucrării tehnologice, șlefuirea de finisare cu diamant.

În figura 9.8, 9.9 și 9.10 este studiat un lagăr conic din safir, iar în figura 9.11 este prezentat un lagăr conic din rubin.



Figura 9.8

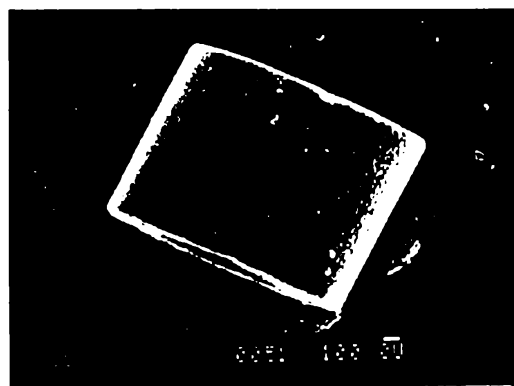


Figura 9.9

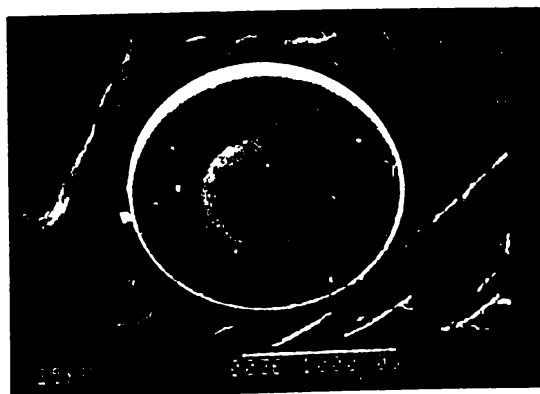


Figura 9.10

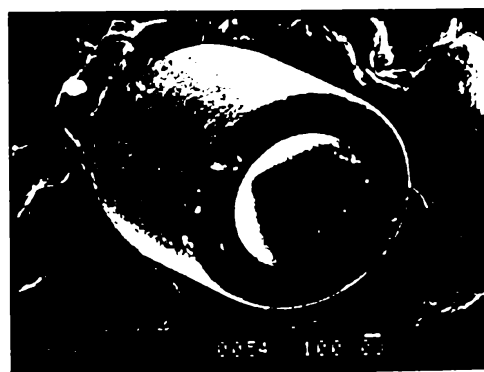


Figura 9.11

Se studiază apoi muchiile interioare și exterioare, cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj, mărind proba de 1000 de ori.

În figura 9.12 este prezentată o muchie exterioară și respectiv în figura 9.13 este prezentată o muchie interioară care sunt perfecte, fără zgârieturi și ciobituri.

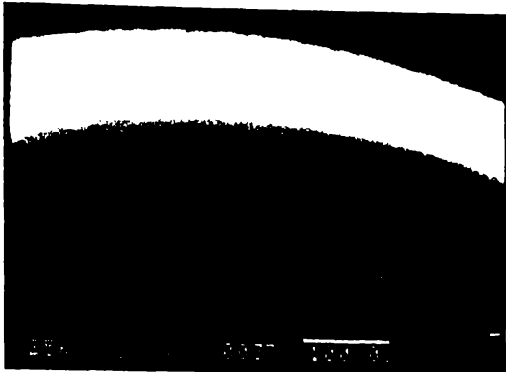


Figura 9.12



Figura 9.13

Din figura 9.12 și în special din figura 9.14 se observă că suprafața cilindrică exterioară, exact ca la toate celelalte tipuri de lagăre analizate, nu este perfect netedă.

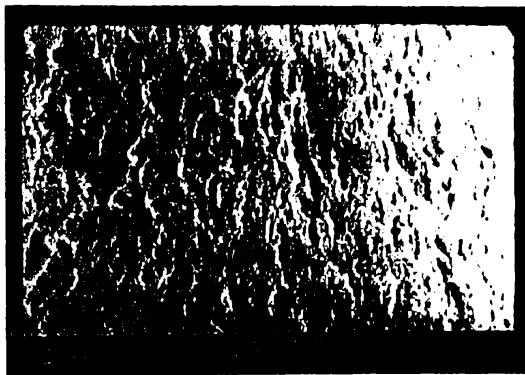


Figura 9.14

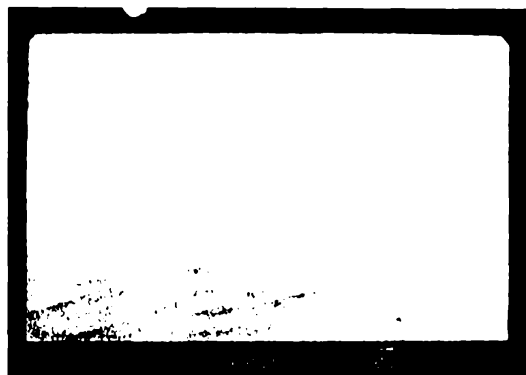


Figura 9.15

În figura 9.15 este studiată suprafața conică. Se observă urmele prelucrării tehnologice, respectiv zgârieturi datorate pulberii diamantate. În figurile 9.16, 9.17, 9.18 și 9.19 se observă în dreptul muchiei neregularități de tipul ciobiturilor sau craterelor. Aceste imperfecțiuni se datorează defectelor de tipul incluziuni metalice sau bule de gaz, aflate în cristalul inițial, crescut după metoda Verneuil. Aceste ciobituri pot apare însă și datorită unor granule de diamant cu diametrul mai mare decât diametrul prescris pentru finisarea cavității conice. Aceste granule de diamant având diametrul mai mare decât celelalte granule sunt împinse spre exterior unde distrug muchia alezajului conic.



Figura 9.16



Figura 9.17

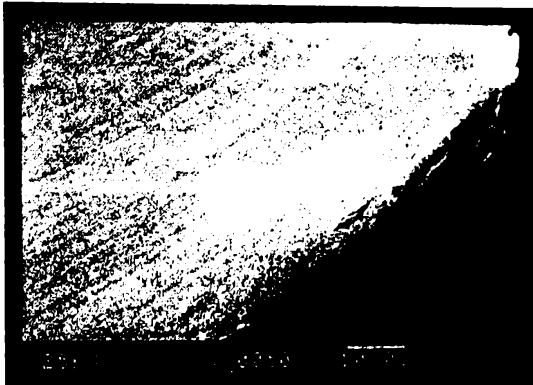


Figura 9.18

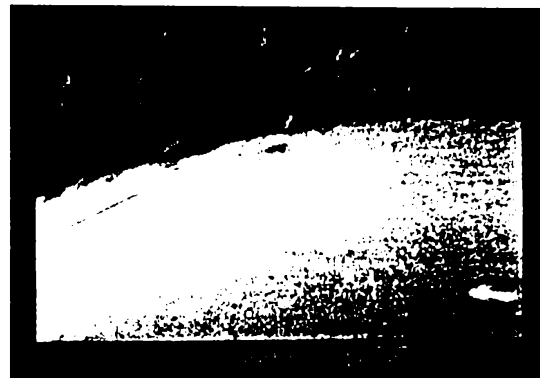


Figura 9.19

În figura 9.20 este studiat un lagăr sferic. Se observă că suprafața exterioară este mult mai rugoasă de cât suprafața corespunzătoare alezajului sferic.

În figura 9.21 și 9.22 sunt studiate muchiile exterioare și interioare ale lagărului sferic. În aceste figuri muchiile sunt de bună calitate.



Figura 9.20

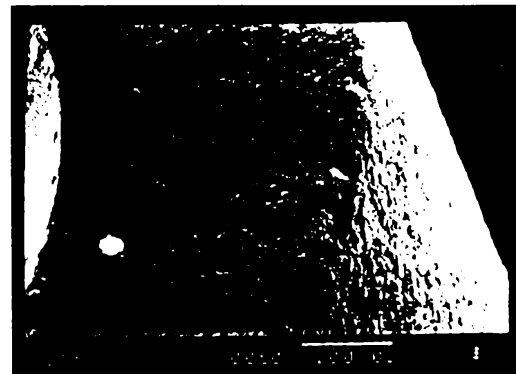


Figura 9.21



Figura 9.22

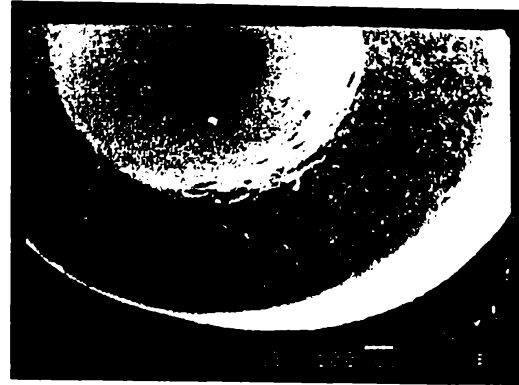


Figura 9.23

În figura 9.23 este prezentată o porțiune din cavitatea sferică în apropierea muchiei afectate de defecte. Aceași suprafață este prezentată mărit în figura 9.24. Aceste defecte pot fi datorate probabil unor incluziuni metalice sau bule de gaz prezente în semifabricatul safir artificial, dar cu siguranță sunt produse și de granule de diamant cu dimensiuni mai mari decât cele prescrise pentru procesul tehnologic de finisare.



Figura 9.24

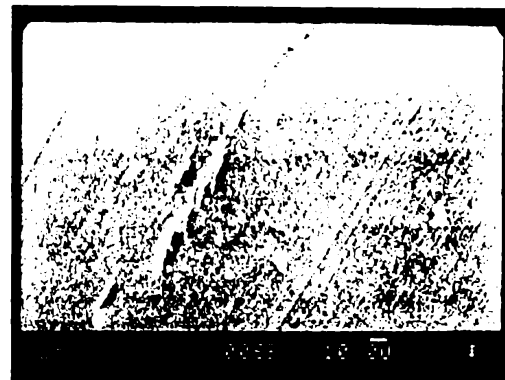


Figura 9.25

În figura 9.25, care studiază o porțiune a cavității sferice, se observă zgârieturi grosolane datorate unor particule de diamant cu dimensiuni prea mari.

În figurile 9.26 și 9.27 se prezintă ciobituri ale muchiilor, datorate în special vibrațiilor apărute în timpul prelucrării tehnologice.

În figura 9.28 este prezentat un lagăr străpuns din rubin, iar în figura 9.29 este prezentat un lagăr străpuns din safir.

În figura 9.30, 9.31 și 9.32 este prezentată suprafața străpunsă a lagărului de rubin. În figura 9.30 și 9.31 se observă că amprenta lăsată de fascicolul laser nu a fost înlăturată complet. În urma perforării cu fascicol laser, cavitatea obținută are o formă neregulată conică, pereții fiind afectați termic pe o adâncime de ordinul micrometrilor.

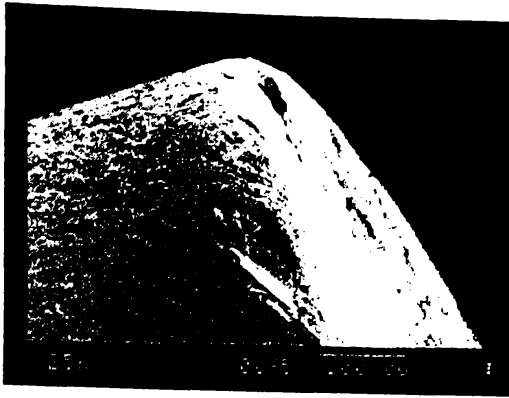


Figura 9.26



Figura 9.27

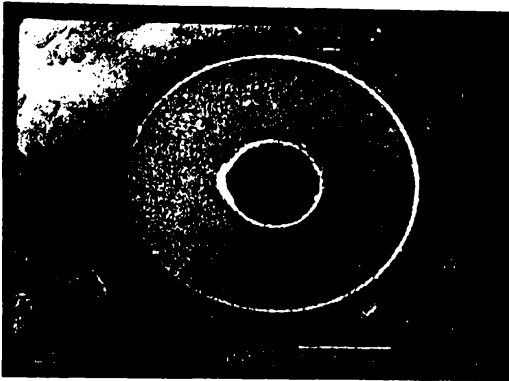


Figura 9.28

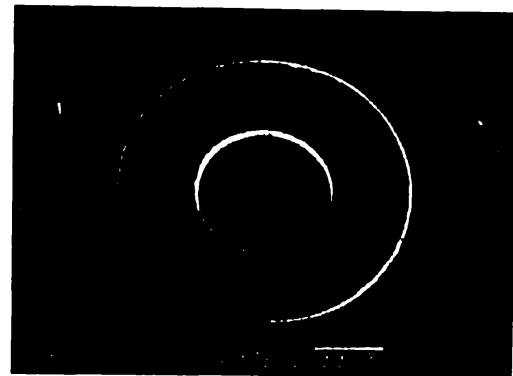


Figura 9.29

Această suprafață se înlătură ulterior în timpul prelucrării tehnologice de lărgire și de alezare. După cum se remarcă din figurile 9.30 și 9.31 această suprafață afectată termic nu este înlăturată uneori complet.

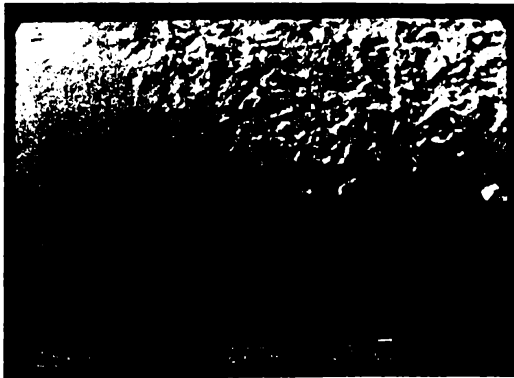


Figura 9.30

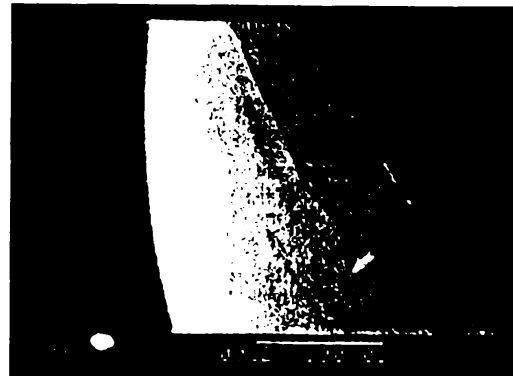


Figura 9.31

În figura 9.32 se studiază muchia interioară a lagărului străpuns din figura 9.28. Pe această porțiune suprafața interioară nu prezintă zone afectate termic de fascicolul laser nerezectificate, în schimb sunt vizibile zgârieturile datorate pulberii de diamant utilizată la șlefuirea suprafeței respective. În dreptul muchiei interioare se observă și ciobituri, care se datorează vibrațiilor apărute în procesul tehnologic de prelucrare a alezajului.



Figura 9.32



Figura 9.33

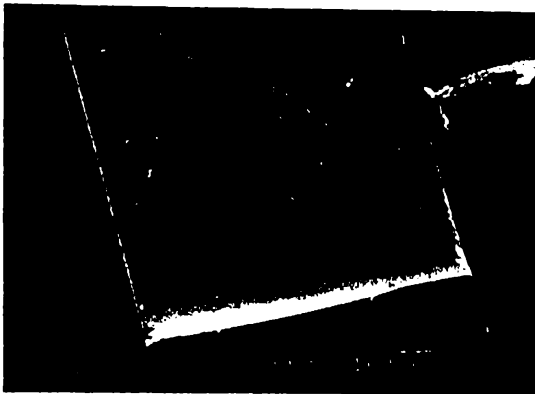


Figura 9.34

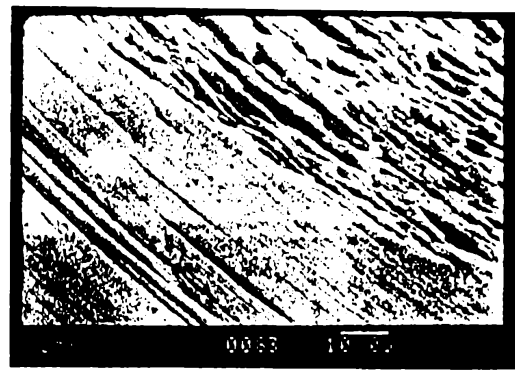


Figura 9.35

În figurile 9.33, 9.34 și 9.35 sunt prezentate porțiuni ale suprafeței interioare alezajului, corespunzător lagărului de safir studiat în figura 9.29. Se observă că alezajul interior, prezintă zone afectate termic de fasciculul laser, parțial nerezectificate. De asemenea în figura 9.35 se observă și zgârieturi datorate pulberii de diamant a cărei granule nu se încadrează în dimensiunile prescrise.

În concluzie, tehnologia de fabricație a lagărelor de safire și rubine artificiale descrisă în capitolul 5, nu este ireproșabilă. Persoanele care lucrează în domeniul prelucrării lagărelor din safire și rubine artificiale sunt dotate cu răbdare, manualitate, pasiune și conștiință profesională ireproșabilă, de aceea această muncă migăloasă este încredințată muncitorilor cu înaltă calificare.

Pentru că să se elimine pe cât posibil prezența bulelor de aer și a incluziunilor metalice existente în masa cristalină este necesar ca fiecare lagăr plan supus ulterior operațiunilor de prelucrare a cavităților conice, sferice sau străpunse să fie examinat minuțios cu stereomicroscopul.

Suprafața cilindrică exterioară a lagărului, nefiind o suprafață activă, nu este necesar să fie extrem de fină (figura 3.8). De aceea în figurile 9.3, 9.5, 9.9, 9.10, 9.11 ... etc, se remarcă că această suprafață prezintă un grad de finisare inferior în raport cu celelalte suprafețe ale lagărului. Important este să se respecte toleranțele dimensiunilor lagărului, astfel încât lagărul să fie montat în lăcașul destinat lui fără a fi fisurat.

Suprafața frontală a lagărului, în cazul lagărului plan, fiind o suprafață activă este necesar să fie perfect șlefuită, vezi figura 9.7.

Normele internaționale prevăd ca suprafața cavității conice precum și a alezajului străpuns (figurile 3.23, 3.24 și 3.3) să fie cu gradul cel mai fin de șlefuire, vezi figurile 9.15, 9.22. Lagărele care nu respectă aceste norme sunt considerate rebuturi, vezi figurile 9.30, 9.31, 9.33, 9.34 și 9.35.

Defectele prezente în apropierea muchiilor pot fi neglijate, partea activă fiind considerată fundul cavității sferice sau conice.

Pentru ca să evităm situațiile din figurile 9.30, 9.31, 9.33 ... etc, se aleg parametrii fascicolului laser astfel încât să se obțină adâncimea mare de perforare, la o secțiune circulară a fascicolului laser mică. Modul de alegere a parametrilor fascicolului laser pe baza metodelor statistice a fost prezentat în capitolul 7.

Micropulberea de diamant cu care se execută operațiile de finisare, trebuie să aibă o granulație extrem de fină. În cazul în care din neatenție în micropulberea de diamant se strecoară granule cu dimensiuni mult mai mari în raport cu granulația de bază, apar defecte cum ar fi rizurile, vezi figurile 9.19, 9.25, 9.27, 9.32, 9.35 ... etc .

Pentru ca să evităm apariția acestor defecte se recomandă examinarea microscopică a micropulberilor.

În figurile 9.3, 9.9, 9.26 și 9.32 apar ciobiri (spargerii) ale muchiilor lagărelor de safire sau rubine artificiale, situație care se datorează în general ciocnirii lagărelor de dispozitivele utilizate pentru prelucrarea lor. Pentru atenuarea acestor defecte este necesar ca lagărele să fie manipulate cu delicatețe.

10. Concluzii generale și contribuții originale

1. Pentru prima dată, în vederea optimizării prelucrării alezajelor cu fascicul laser în lagărele din safire și rubine, s-au stabilit parametrii care intervin în acest proces tehnologic, grupându-și în mărimi de intrare aferente instalației laser și mărimi de ieșire, care caracterizează alezajul obținut. Ca mărimi de intrare de intrare s-au considerat: capacitatea sistemului de pompaj, tensiunea de încărcare a sistemului de pompaj, numărul de impulsuri aplicate, și deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fascicolului laser. Pentru a mări complexitatea experimentului, s-au stabilit diferite nivele pentru parametrii de intrare.

Ca mărimi de ieșire s-au ales: diametrul maxim de intrare al micoralezajului, X , diametrul minim de intrare al microalezajului, Y , și adâncimea microalezajului, Z .

2. Pentru a descrie procesul tehnologic de prelucrare a microalezajelor cu fascicul laser, a fost realizat un experiment utilizându-se instalația laser de la I.A.E.M. Timișoara. Pentru realizarea experimentului s-au prelucrat cu fascicul laser, alezaje în 840 de lagăre plane din safire și rubine. Numărul mare de încercări, 840, a fost necesar pentru a se epuiza toate combinațiile celor patru variabile independente, parametrii de intrare cu nivelele lor de variație, obținându-se astfel o paletă largă de date necesare pentru a descrie obiectiv procesul tehnologic de perforare a alezajelor cu fascicul laser.

3. S-a stabilit ierarhizarea parametrilor de intrare. În acest scop s-a ales metoda balanței aleatoare, pentru că este cea mai rapidă și economică metodă de selectare și ordonare a factorilor semnificativi. Ordinea de influență a parametrilor de intrare asupra procesului studiat atât la lagărele din safir cât și la cele de rubin este: numărul de impulsuri

aplicate, deplasarea suprafeței de prelucrat în raport cu planul de focalizare al fasciculului laser, tensiunea și capacitatea.

4. Pentru a stabili modelul matematic al experimentului, s-a utilizat experimentul factorial complet, deoarece dispunem de numărul de încercări necesare pentru aplicarea acestei metode și deoarece această metodă permite o ascensiune rapidă spre zona optimului, prin utilizarea metodei gradientului ca metodă de optimizare.

Aplicând metoda experimentului factorial, s-au stabilit coeficienții de regresie și ecuațiile de regresie atât în cazul alezajelor prelucrate în lagăre de safir cât și rubin.

În urma investigațiilor făcute cu ajutorul metodei experimentului factorial complet, se stabilește că toți coeficienții ecuației de regresie sunt semnificativi, ecuația liniară de regresie este adecvată datelor experimentale și modelul poate fi utilizat pentru rezolvarea în continuare a problemei de optimizare.

Deci parametrii de ieșire, diametrul maxim al microalezajului, X , diametrul minim al microalezajului, Y și adâncimea microalezajului, Z , sunt adecvați, atât în cazul safirului cât și a rubinului, la aplicarea unei metode de optimizare.

5. S-a folosit ca metodă de optimizare, metoda gradientului. Prin domeniu optim, în cazul analizat se înțeleg acele valori ale parametrilor fasciculului laser, pentru care alezajul care se obține are forma circulară, este cât mai apropiat de forma cilindrică, deci adausul de prelucrare este mic, iar eficiența economică de prelucrare este ridicată.

Metoda gradientului indică un optim, când planul focal se află în interiorul piesei, la o treime din înălțimea lagărului. Această remarcă este valabilă, atât în cazul alezajelor prelucrate în lagărele de safir cât și de rubin.

De asemenea se observă că în zona de optim, valorile celor două diametre ale alezajului, maxim și minim sunt apropiate între ele, raportul X/Y în zona de optim se apropie cel mai mult de unitate, iar forma alezajului se apropie de forma circulară.

6. Datele experimentale utilizate pentru aplicarea metodei experimentului factorial complet, au fost folosite și pentru programul STAT GRAPHICS, obținându-se astfel pentru variabilele X , Y și Z , 18 reprezentanți ale suprafețelor de răspuns atât pentru lagărele de safir cât și de rubin.

Aceste suprafețe de răspuns sunt foarte importante din punct de vedere tehnologic, pentru prelucrarea alezajelor de dimensiuni impuse în lagărele de safire și rubine.

Înainte, pentru a se obține un alezaj de anumite dimensiuni erau necesare un număr mare de încercări experimentale de tatonare, până se obținea un alezaj cu aceleași dimensiuni ca cele prescrise. În urma acestor încercări se prelucrau alezaje într-un număr mare de lagăre considerate ulterior rebuturi.

Deci prin aplicarea programului STAT GRAPHICS, eficiența economică de prelucrare a alezajelor crește, deoarece valorile parametrilor de intrare se stabilesc rapid, utilizând suprafețele de răspuns.

Programul STATGRAPHICS este astfel conceput, încât valorile parametrilor de intrare să fie în limitele domeniului optim. Sunt evitate astfel valorile extreme ale parametrilor instalației laser, motiv pentru care numărul lagărelor care se sparg în timpul prelucrării este scăzut, iar productivitatea prelucrării, respectiv eficiența economică crește.

7. S-a realizat modelarea teoretică a procesului de găurire cu laser pentru un impuls. S-a stabilit astfel corelarea dintre repartizarea temperaturii în timpul procesului tehnologic de perforare și adâncimea alezajului.

8. Pentru punerea în evidență a defectelor care apar în structura cristalină a lagărelor de safir și rubin s-a efectuat un experiment original cu ajutorul metodei corodării chimice.

Lagărele din safir și rubin au fost atacate cu bisulfat de potasiu la temperatura de 600°C . Metoda corodării chimice evidențiază dizlocațiile.

S-au obținut fotografiile ale dizlocațiilor cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj.

S-a propus un tratament termic pentru a se îmbunătăți calitatea lagărelor prelucrate cu fascicul laser.

9. S-au realizat 35 de microfotografii cu ajutorul microscopului cu baleiaj. Aceste microfotografii reprezintă suprafețe ale lagărelor plane, conice, sferice, și străpunse și au fost făcute cu scopul de a studia calitatea suprafețelor acestor lagăre.

Studiind aceste microfotografii s-au observat imperfecțiuni ale tehnologiei de prelucrare a acestor lagăre și s-au propus câteva îmbunătățiri.

BIBLIOGRAFIE

1. O. ACZEL , “Dizlocațiile și Frecarea Interna la Metale”
Editura Facla 1974
2. J. G. ANDREWS , R. R. Mc LONE , “Mathematical Modelling”
Editura Butterworths, Londra 1976
3. P. I. ANTONNOV , S. P. NIKANOROV, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam, nr. 50, an 1980
4. C. BALABAN, “Strategia Experimentării și Analiza Datelor Experimentale”
Editura Academiei, București 1993
5. A. BALLMAN , R. A. LAUDISE, “The Art Science of Growing Crystals”
New York 1963
6. A. BALLMAN, “Hydrothermal Synthesis of Sapphire”
New York 1957
7. P. BENNEMA, G. H. GLIMER, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam, nr. 5 , 1973
8. P. BENNEMA, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam , nr. 1, 1967
9. P. BENNEMA, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam , nr. 5, 1969
P. BENNEMA, G. H. GLIME , “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam , nr. 13/14 , 1972
10. M. BIJI, E. BIJI, “Statistică Teoretică”
Editura Didactică și Pedagogică, București 1979
11. O. BIRĂU, “Safirul și Rubinul”
Editura Facla , 1986
12. O. BIRĂU, D. VANGHELI, P. IAICHICI, A. CIUHANDU, “Analele -
Universității Timișoara”
Seria Fizică, nr. 56, 1984
13. O. BIRĂU, “Topografia cu Raze X a Imperfecțiunilor Rețelei Cristaline”
Teză de doctorat, Universitatea Timișoara, 1971
14. Z. BÍKOV, A. EFREMOV, “Tehnologia Prelucrării Pieselor Optice”
Editura Tehnică, București 1977, vol .1
15. V. A. BORODIN, E. A. BRENER, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam, nr. 52, an 1981
16. V. A. BORODIN, A. M. IONOV, “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam, nr. 104, an 1990
17. G. BORRMAN, K. LEHMAN, “Direct Observation of Imperfections in
Crystals”
Editura Interscience, New York 1962
18. J. C. BRICE, “The Growth of Crystals from the Melt”
Amsterdam 1965
19. D. CEAUȘESCU, “Utilizarea Statisticii Matematice în Chimia Analitică”
Editura Tehnică , București 1982
20. B. CHALMERS , “Journal of Crystal Growth”
Amsterdam, nr 13/14 , an 1972
21. G. CHRYSOLOURIS, “Laser Machining”
Spring Verlag, Stuttgart

-
22. G. CIUCU, V. CRAIU, "Introducere în Teoria Probabilităților și Statistica Matematică"
Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971
23. G. CIUCU, V. CRAIU, A. ȘTEFĂNESCU, "Statistică Matematică și Cercetări Operaționale" vol 1, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1974
24. I. M. COE, D. ELWELL, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 23, 1974
25. R. T. COX, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 15, 1972
26. T. DEMIAN, A. PASCU, "Lagăre și Ghidaje Pentru Aparate"
Editura Academiei RSR, 1980
27. T. DEMIAN, "Elemente Constructive de Mecanică Fină"
E.T.P., București, 1990
28. T. DEMIAN, D. TUDOR, "Bazele Proiectării Aparatelor de Mecanică Fină"
Editura Tehnică, București 1984
29. GH. DIACONESCU, C. MICU, "Tehnologia Mecanicii Fine și Microtehnicii"
Editura Tehnică, București 1985, vol 2
30. E. R. DOBROVINSKAYA, L. A. LITVINOV, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 104, 1990
31. O. DONTU, "Tehnologia de Prelucrare cu Laser"
Editura Tehnică, București 1985
32. F. DONALD, F. WEIRAUCH, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 19, 1972
33. A. B. DREEBEN, K. M. KIM, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 50, 1980
34. D. ELWELL, "Crystal Growth"
Pergamon, Oxford 1975
35. I. GAVRILAȘ, E. DRĂGUȚ, "Tehnologii de Prelucrare cu Scule din Materiale Dure și Extradure"
Editura Tehnică, București 1977
36. GILMAN, "The Art and Science of Growing Crystals"
New York 1965
37. G. H. GLIMER, R. CHEZ, N. CABRERA, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 8, 1971
38. S. GOLDSZTAUB, R. ITTI, F. MUSSARD, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 6, 1970
39. F. GRÜNWARD, "Fertigungsverfahren in der Gerätetechnik"
VEB Verlag Technik, Berlin 1985
40. M. HIGUCHI, D. MIYAUCHI, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 121, 1992
41. W. HILDEBRAND, "Elemente Constructive de Mecanică Fină"
Berlin 1980
42. D. T. J. HURLE, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 63., 1983
43. D. V. ILIESCU, V. GH. VODĂ, "Statistică și Toleranțe"
Editura Tehnică, București 1977
44. I. M. JURAN, F. M. GYRNA, "Calitatea Produselor"
Editura Tehnică, București 1973
-

-
45. J. P. KALEJS, H. M. ETONNEY, R. A. BROWN, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 65, 1983
46. D. R. KINLOCK, C. E. BIRCHENALL, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 19, 1973
47. N. KOBAYASHI, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 54, 1981
48. K. KOKINI, T. R. HORNACK, "Journal of Engineering Materials and Technology"
ianuarie 1988
49. W. KRAUSE, "Konstruktion Elemente der Feinmechanik"
Carl Hanser Verlag, München 1993
50. G. KRUG, "Mechanische Uhren" - Einzelteile, Baugruppen, Werk und Hilfsstoffe
VEB Verlag Technik, Berlin 1987
51. H. E. La BELLE jr, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 50, 1980
52. H. G. LIPSON, A. KAHAN, J. ADAMSKI, E. FARREL, M. REDMAN, J. KAWMURA, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 5, 1969
53. N. I. MARINESCU, "Prelucrarea cu Ultrasunete"
Editura Tehnică, București 1986
54. MARTINEK, REHOR, "Mechanische Uhren"
Tehnik Verlag, Berlin 1978
55. J. MECHOLSKY, "Journal of Applied Physics"
vol. 50, nr. 8, august 1979
56. I. MENESSY, "Curs de Cristalografie"
Litografia Institutului Politehnic "T. Vuia" 1975
57. K. MENNY, "Die Funktion der Uhr"
München Callenwey 1989
58. H. MERZ, U. SPITZER, "Werkstofftechnische Aspekte des Zählerunterlagers in Theorie und Praxis"
Prospect al firmei Landis & Gyr
59. R. MIHAIL, "Introducere în Strategia Experimentării cu Aplicații din Tehnologia Chimică"
Editura Științifică și Enciclopedică, București 1976
60. GH. MIHOC, V. URSEANU, "Sondaje și Estimații Statistice"
Editura Tehnică, București 1977
61. C. MOINEAGU, V. URSEANU, "Prelucrări prin Eroziune în Construcția de Mașini"
Editura Științifică și Enciclopedică, București 1976
62. A. NICHICI, V. POPOVICI, "Prelucrări prin Eroziune în Construcția de Mașini"
Editura Facla
63. A. NICHICI, V. POPOVICI, "Implicații Tehnologice ale Fenomenologiei Prelucrării cu Fascicule Laser a Materialelor Parțial Transparente"
Simpozion de mecanisme și transmisii mecanice, Timișoara 1980
64. A. NICHICI, V. POPOVICI, "Geometria și Precizia Relativă a Microalezajelor Prelucrate cu Fascicule Laser în Semifabricatele din Rubin"
Timișoara, 1980
-

-
65. A. NICHICI, V. POPOVICI, "Probleme ale Tehnologiei Lagărelor din Rubine și Safire Sintetice"
 Simpozion de mecanisme și transmisii mecanice, Timișoara 1980
66. A. NICHICI, E. CICALĂ, "Prelucrarea Datelor Experimentale"
 Curs și Aplicații - manuscris 1993
67. I. NICOARĂ, D. NICOARĂ, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 82, 1987
68. I. NICOARĂ, D. NICOARĂ, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 104, 1990
69. I. NICOARĂ, "Cristale Artificiale Profilate"
 Editura Facla 1988
70. I. NICOARĂ, O. ACZEL, "Formarea Defectelor de Structura în Cristale în Procesul de Creștere"
 Monografia de fizică, Universitatea Timișoara, vol. 9, 1989
71. I. NICOARĂ, D. NICOARĂ, "Cristale Profilate - Obținere și Aplicații"
 Monografia de fizică, Universitatea Timișoara, vol. 7, 1987
72. R. E. NOVAK, R. METZL, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 50, 1980
73. S. O'HARA, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 3/4, 1968
74. H. ORLICK, "Tehnologi de Prelucrare a Corpurilor Solide cu Laser. Instalații pentru Găurire și Tăiere"
 ZIS-REPORT, reviste R.D.G., nr. 5, 1990
75. B. PERNER, J. KVAPIL, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 52, 1981
76. J. RICHARD, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 13/11, 1972
77. W. RICHARDTZ, "Über die Züchtung von Einkristallen nach Verneuil und deren Mikroskopische, Röntgenographische und Chemische Untersuchungen"
 Bonn 1967
78. H. RIHGHANDT, CH. WIRTH, "Feinwerkelemente"
 Carl Hanser Verlag, München 1992
79. L. SACHS, "Angewandte Statistik, neubearbeitete und erweiterte Auflage der statistische Auswertungsmethoden"
 Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1974
80. K. SCHMETZER, "Natürliche und synthetische Rubine"
 Stuttgart 1986
81. K. SCHLOSSMACHER, "Edelsteine und Perlen"
 E. Schweizerbartische Verlag, Stuttgart 1962
82. W. SEIFERT, "Journal of Crystal Growth"
 Amsterdam, nr. 12, 1972
83. I. SIROTIN, "Fizica Cristalelor"
 Editura Științifică și Enciclopedică, București 1981
84. G. SPENGLER, F. WUNSCH, "Schmierung und Lagerung in der Feinwerktechnik"
 Düsseldorf 1970
85. J. STEFFEN, J. RANDIN, "Processing of Ceramic Materials by Laser Beam"
 LASAG-INDUSTRIAL-LASER
86. T. SUREK, B. CHALMERS, "Journal of Crystal Growth"
-

-
- Amsterdam, nr. 29, 1975
87. B. STEVERDING, H. DUDEL, "Laser - Induced Shocks and Their Capability to Produce Fracture"
Journal of applied physics, vol. 47, nr. 5, mai 1976
88. D. TALOI, "Optimizarea Proceselor Tehnologice"
Editura Academiei București 1987
89. I. TARJAN, M. MATRA, "Laboratory Manual on Crystal Growth"
Kiado Academy, Budapest 1972
90. V. TATARCENKO, E. BRENER, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 50, 1980
91. V. TATARCENKO, T. YALOVETS, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 50, 1980
92. P. THOMAS, H. ETTONEY, R. BROWN, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 76, 1986
93. M. TIRON, "Prelucrarea Statistică și Informațională a Datelor de Măsurare"
Editura Tehnică, București 1976
94. H. TREUSCH, G. HERZIGER, "Metal Precision Drilling with Lasers Applications"
High Power Lasers and their Industrial Applications, vol. 650, 1986
95. I. VOICULESCU, "Studiul Defectelor Structurii Cristaline din Lagărele de Safir sau Rubin Străpunse cu Laser"
Zilele Academiei Timișorene, octombrie 1995
96. VOICULESCU, "Analiza statistică a Parametrilor Fasciculului Laser Cu Scopul de a Optimiza Prelucrarea Microalezajelor în Lagărele Plane de Safire și Rubine"
Zilele Academiei Timișorene, octombrie 1995
97. VOICULESCU, "Considerații asupra Discurilor Diamantate Utilizate la Debitarea Safirelor și Rubinelor sintetice"
Conferința Națională de Mecanică Fină, București, 1994
98. VOICULESCU, "Corelația dintre Proprietățile Fizice ale Monocristalelor de Safire și Rubine și tehnologia de prelucrare a lagărelor"
Conferința Națională de Mecanică Fină, București, 1994
99. VOICULESCU, "Tehnologia de Prelucrare a Cavității Sferice și Conice ale Lagărelor din Safire și Rubine sintetice"
Conferința Națională de Mecanică Fină, București, 1994
100. I. VOICULESCU, "Caracteristicile Fasciculului Laser Utilizat la Străpungerea Lagărelor de Safire și Rubine Sintetice"
Conferința Națională de Mecanică Fină, București, 1994
101. R. WAGNER, "Laser Drilling Mechanics"
Journal of Applied Physics, vol. 45 n. 10, octombrie 1974
102. K. WATANABE, Y. SUMIYOSHI, "Journal of Crystal Growth"
Amsterdam, nr. 41, 1977
103. K. WILKE, "Kristallzuchtung"
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1973
104. E. WILKS, "Suprafețele de Clivaj ale Diamantelor"
Industrial Diamond Review, nr. 1, Marea Britanie 1987
105. L. YAVERBAUM, "Synthetic Gems, Production Tehnics"
New Jersey 1980
106. XXX, "Les Rubis Synthetiques des Alpes"
-

Ugine Kuhlmann - Jarrie France 1978 - prospect
107. XXX, "Lagăre din Safire și Rubine Artificiale"
Prospect IAEM - Timișoara
108. XXX, "Fizika I Kimia Obrabotki Materialov"
U.R.S.S - revistă, nr. 5, sept. 1990 - Spălarea cu ultrasunete a straturilor
monocristaline de safir